

# Influence of Tire Profile Constraints on Finite Element Analysis

Lingxin Zhang<sup>1</sup>, Daqian Zhu<sup>2</sup>, Yonghua Li<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Product Research and Development Department, Aelus TYRE CO., LTD., Jiaozuo Henan

<sup>2</sup>School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

<sup>3</sup>Kunshan Tian Zheng Precision Instrument Co., Ltd., Kunshan Jiangsu

Email: 1351402141@qq.com, m15751007463\_1@163.com, liyonghua188@163.com

Received: Jul. 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 25<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 6<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Finite element analysis (FEA) technology has been widely used in the tire industry, but how to obtain a reliable tire model easily and accurately still deserves to be studied. In this paper, we mainly study the influence of different constraints of the tire cross-section on the FEA of tire. Taking the 205/55R16 semi-steel radial tire as an example, the tire cross section under the free state and the constrained state with the rim plate was surveyed, and the finite element model was established. In the establishment of the finite element model, the Neo-Hooke constitutive model was chosen to describe the rubber material and the Rebar model was selected to describe the rubber-cord material. Finite element analysis of the contact patch, radial stiffness and inflated outer contour of the tire is carried out to compare with the actual tire test results. Hence, we can find a more reasonable modeling method. The results show that for the inflatable outer contour, the cross-section in the constrained state of the rim meets the modeling requirements better. For the contact patch and radial stiffness, the cross-section under the free state is more suitable for the modeling requirements.

## Keywords

Radial Tire, Cross Section Mapping, FEA, Contact Patch

---

# 轮胎断面的约束方式对有限元分析的影响

张铃欣<sup>1</sup>, 朱大钲<sup>2</sup>, 李永华<sup>3</sup>

<sup>1</sup>风神轮胎股份有限公司产品研发部, 河南 焦作

<sup>2</sup>江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏 镇江

<sup>3</sup>昆山天正精密仪器有限公司, 江苏 昆山

Email: 1351402141@qq.com, m15751007463\_1@163.com, liyonghua188@163.com

收稿日期: 2018年7月11日; 录用日期: 2018年7月25日; 发布日期: 2018年8月6日

## 摘要

有限元分析技术在轮胎行业已经得到了广泛的应用，但如何便捷、精确的获取真实的轮胎模型仍值得进行研究。本文主要研究采用不同的约束方式对轮胎断面进行测绘建模对轮胎有限元分析造成的影响。以 205/55R16 半钢子午线轮胎为例，分别对自由状态和使用轮辋卡板约束状态下的轮胎断面进行测绘，并以此为基础进行了有限元建模。在建立有限元模型时，选用了 Neo-Hooke 本构模型描述橡胶材料，Rebar 模型描述橡胶-帘线材料。对轮胎的接地印迹、径向刚度和充气外轮廓进行了有限元分析，以此与实际轮胎的试验结论进行对比，寻找更加合理的建模方式。结果表明，对于充气外轮廓来说，轮辋约束状态下的断面更符合建模要求。而对于接地印迹和径向刚度来说，自由状态下的断面更符合建模要求。

## 关键词

子午线轮胎，断面测绘，有限元分析，接地印迹

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

有限元分析技术在轮胎行业已经得到了广泛的应用，但如何便捷、精确的获取真实的轮胎模型仍值得进行研究。在 20 世纪 70 年代，FEA 开发出了应力/应变的内部轴对称代码，可以研究轮胎耐久性。现在，FEA 与优化技术相结合，可以优化胎侧结构，轮胎胎冠形状，齿距变化，轮胎花纹等方面[1]。A Abe [2]将优化技术运用于轮胎设计。刘峰[3]等人考虑了轮胎的材料非线性、几何非线性、橡胶帘线复合材料各向异性等对轮胎进行非线性有限元分析。由此可见，研究员们通过全方位的考虑轮胎结构和性能提高有限元模型的准确性和有效性。

但在轮胎建模之前，需要对实际轮胎的断面进行测绘并以此进行建模，而测绘时不同的测绘方法以及轮胎断面不同的约束方式都会对有限元分析的准确性造成影响。彭赐龙[4]等人研究并提出了一种断面测绘方法，该方法应用于轮胎测绘及分析过程中，包括切割、打磨、画线、测绘和验证等环节。谢雷[5]等人发明了一种轮胎断面结构测绘仪及测绘方法。刘巧霞[6]研究了轮胎断面自动测绘系统中的图像处理方法。肖玉霜[7]对轮胎断面拼接，三角胶层边缘及外轮廓提取算法进行深入的研究和试验。由此可见，研究员们对断面的测绘方法有过很多研究，但是目前测绘时轮胎断面的约束方式对轮胎模型的影响还没有人有过深入的研究。因此本文为了研究轮胎断面测绘时的约束方式对有限元分析的影响，以 205/55R16 半钢子午线轮胎为例对自由状态和用轮辋卡板约束的轮胎断面进行了测绘，并以此为基础分别进行了有限元建模。为了确定哪种固定方式更有利于有限元仿真，本次研究的内容将会包括轮胎的接地印迹、径向刚度和充气外轮廓，并与相对应的实际数据进行对比。

## 2. 有限元模型的建立

本文以 205/55R16 半钢子午线轮胎为例建立轮胎结构有限元模型，此模型中仅考虑纵向花纹的作用。以约束状态的断面为例，建立二维模型。先在 Autocad 中对得到的断面图像进行几何处理得到轮胎的材料分布图，然后将其导入 Hypermesh 中进行网格划分建立二维模型，如图 1 所示。将建好的二维模型导入 Abaqus 中进行有限元分析。

## 2.1. 有限元模型的信息

本文在 Abaqus 中定义轮胎材料并根据橡胶属性选择合适的单元进行模拟。对轮胎橡胶部分采用 CGAX3H 和 CGAX4H 单元进行模拟，用 SFMGAX1 单元来模拟轮胎的帘线部分。二维模型的单元数为 1278，节点数为 1406 个。本文中将橡胶-帘线材料运用于带束层、冠带层和胎体层，使用 Rebar 模型进行模拟，而橡胶材料使用 Neo-Hooke 本构模型进行模拟[8]。

## 2.2. 有限元模型的边界条件

如图 2 所示，有限元分析的主要分为以下三个步骤：

第一步，对轮胎进行充气。因为轮胎模型是轴对称的，因此可以使用二维模型进行充气。采用解析刚体定义轮辋，对轮辋和轮胎采用过盈配合，轮辋和轮胎的接触处定义了接触，摩擦系数为 0.05。在轮胎模型的内衬层内表面均布 240 KPa 的充气压，充气时过盈会被消除，随着气压升高完成装配。

第二步为旋转，将二维轮胎模型旋转 360°，120 份，使其周向网络保持均分，得到轮胎的三维充气模型。在轮胎下方使用解析刚体定义了路面，对路面与轮胎之间的接触处定义了接触，摩擦系数为 0.7。

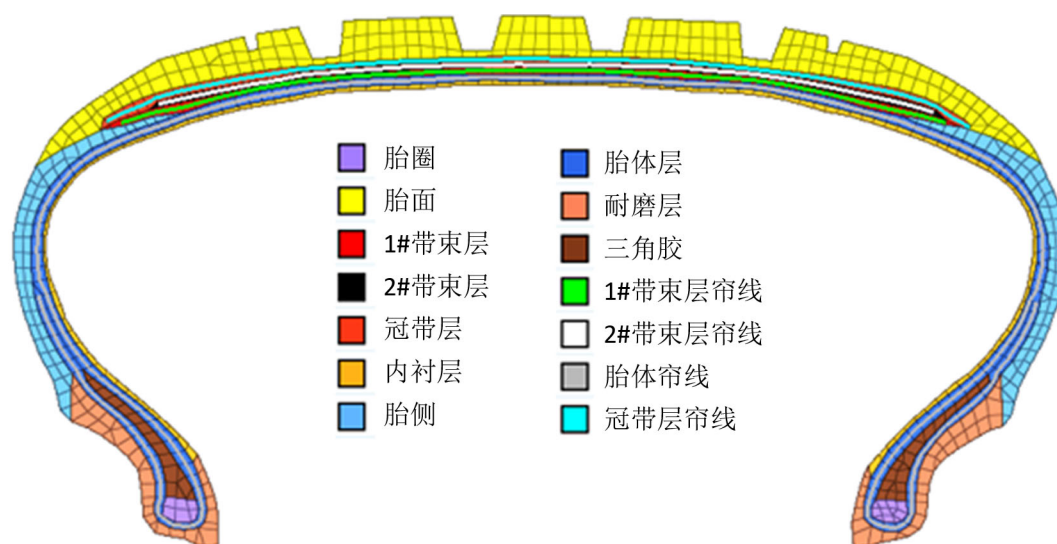


Figure 1. Two-dimensional tire model

图 1. 二维轮胎模型

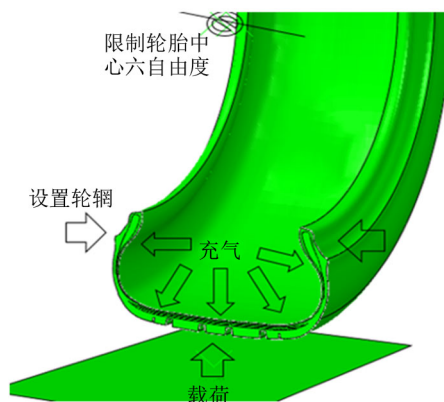


Figure 2. Boundary conditions

图 2. 路面加载的边界条件

第三步为路面加载，固定轮胎中心的六向自由度，通过向上平移路面模拟轮胎的加载，径向载荷为4000 N，根据得到的路面位移以及轮胎模型可以计算轮胎的径向刚度和接地印迹。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 充气外轮廓

轮胎的充气外轮廓是指轮胎的充气断面、充气外周长。轮胎的充气断面是指轮胎的断面宽度。轮胎的断面宽度是指在一定的充气压力下，轮胎断面两侧之间的最大宽度。如图3所示为两种状态下有限元模型的充气断面对比。充气外周长是指充气轮胎胎冠中心线绕轮胎一周所得到的直线的长度。如图4所示，在三维有限元模型中，轮胎直接由二维模型旋转而来，所以外周长可以通过量取轮胎的半径直接计算得到。表1为两种状态下的充气外轮廓数据对比。

由表1中的数据进行横向对比可以发现轮胎断面宽度的误差较大，充气外周长的误差较小。这主要是因为同样的充气压力和载荷下，同一个轮胎的充气外周长很难有较大的变化。而轮胎模型的两侧在不同约束下会有较大变化，从而导致轮胎的断面宽度有较大的变化。若进行纵向对比可以清楚的发现使

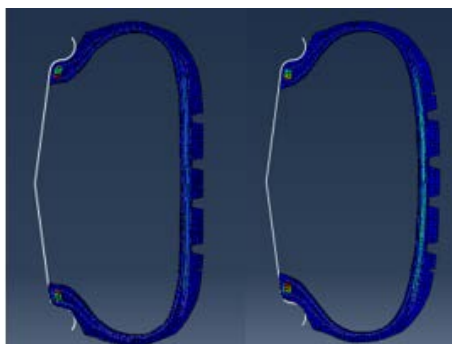


Figure 3. Comparison of inflatable sections (left is free state, right is constrained state)

图3. 充气断面对比(左为自由状态, 右为约束状态)

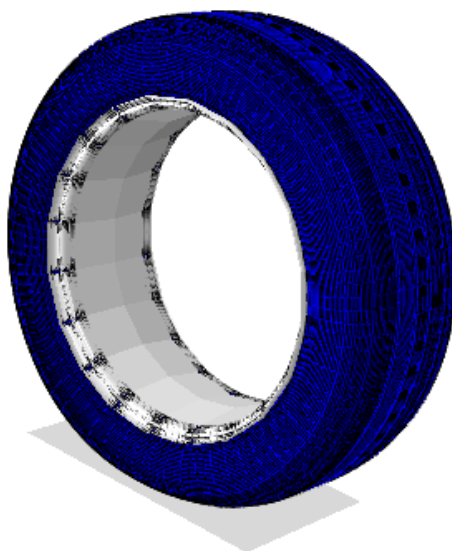


Figure 4. Three-dimensional tire model

图4. 三维轮胎模型

用在约束状态下的轮胎断面扫描得到的截面进行有限元建模所得到的轮胎充气外轮廓较为合理一些，这主要是因为约束状态下的轮胎外轮廓更加符合实际轮胎使用时的形状。

### 3.2. 接地印迹

轮胎的接地印迹是指静态轮胎在垂直载荷下，轮胎与刚性平面相接触所产生的压印痕迹，压印痕迹可以用接触压力分布图表示。轮胎的接地印迹会随着轮胎所受到的载荷和充气压力的改变而改变，因此进行有限元分析时，两个有限元模型的载荷都确定为 4000 N，充气压力为 240 kPa。在有限元仿真以后，进行后处理将会得到接地印迹，如图 5 和图 6 所示。在处理时，可以使用胎面接地长度、胎面接地宽度和接地面积作为评价指标[9]。如表 2 所示为两种状态下的接地印迹的评价指标数据对比。

胎面接地长度是指静态轮胎在垂直负荷作用下，胎面花纹和刚性平面相接触，其接地面外周沿轮胎圆周切线方向的最大距离。如图 5 中 L 所示。

Table 1. Comparison of the data of the inflatable outer contour

表 1. 充气外轮廓的数据对比

	实际轮胎	自由状态	相对误差	约束状态	相对误差
断面宽度(mm)	215	238.3	10.8%	223.5	4.0%
充气外周长(mm)	1985.2	1928.3	2.87%	1967.3	0.9%

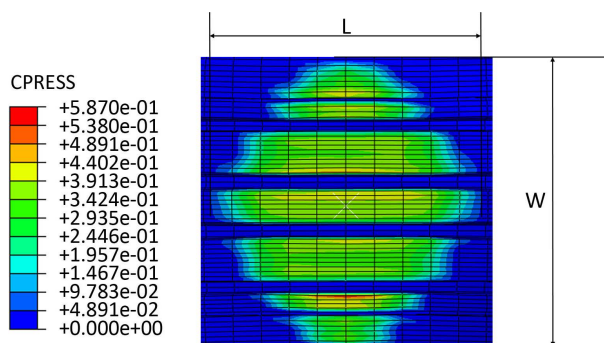


Figure 5. Contact patch of a model built with a section under constrained state

图 5. 以约束状态下的截面所建模型的接地印迹

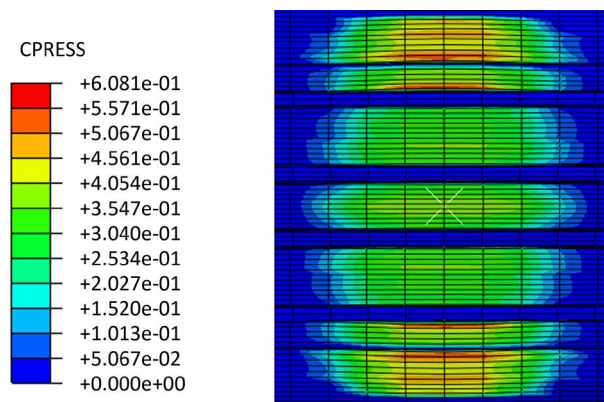


Figure 6. Contact patch of a model built with a section under free state

图 6. 以自由状态下的截面所建模型的接地印迹

胎面接地宽度是指静态轮胎在垂直负荷作用下，胎面花纹和刚性平面相接触，其接地面外周沿轮轴方向的最大距离。如图 5 中 W 所示。

接地面积为静态轮胎在垂直载荷下，轮胎与路面的接触面积。

从图 5、图 6 和表 2 中可以发现使用在约束状态下的轮胎断面扫描得到的截面进行有限元分析得到的接地印迹呈椭圆形，轮胎周向接地长从胎肩向胎面中心逐步增长，它的接地压力分布较为均匀，与实际轮胎的接地印迹差别较大。这是因为约束状态下的轮胎模型两侧有所下凹，导致胎面有所凸出，从而使轮胎模型的接地偏向椭圆形，且其中心处压力较高。使用在自由状态下的轮胎断面扫描得到的截面进行有限元分析得到的接地印迹呈矩形，轮胎周向接地长分布较为均匀，胎肩部分的接地压力较高，与实际轮胎的接地印迹较为接近。这是因为自由状态下的轮胎模型胎面较为平顺，加载时周向较为均匀。因此以自由状态下的轮胎断面所建有限元模型的接地印迹更为合理。

### 3.3. 径向刚度

轮胎的径向刚度是指轮胎在一定的充气条件下，它的径向受力情况与其径向变形之比。轮胎的径向载荷和径向位移成正比关系，因此可以对有限元仿真得到的点进行一元回归分析拟合得到轮胎的径向刚度。计算公式 1 如下所示，图 7 左右分别为轮胎截面在约束状态下和自由状态下时所建模型的径向载荷与径向位移之间的线性关系。表 3 为径向刚度的数据对比。

Table 2. Comparison of data of evaluation index of contact patch

表 2. 接地印迹的评价指标数据对比

	胎面接地长度(L/m)	胎面接地宽度(W/m)	接地面积(S/mm <sup>2</sup> )
实际轮胎	104.5	152.6	11910
自由状态	118.9	160.1	14323
相对误差	13.8%	4.9%	20.3%
约束状态	154.3	165.7	14959
相对误差	47.7%	8.6%	25.6%

Table 3. Comparison of data of radical stiffness

表 3. 径向刚度的数据对比

	实际轮胎	自由状态	相对误差	约束状态	相对误差
径向刚度(N/mm)	206.2	196.2	4.8%	183.8	10.9%

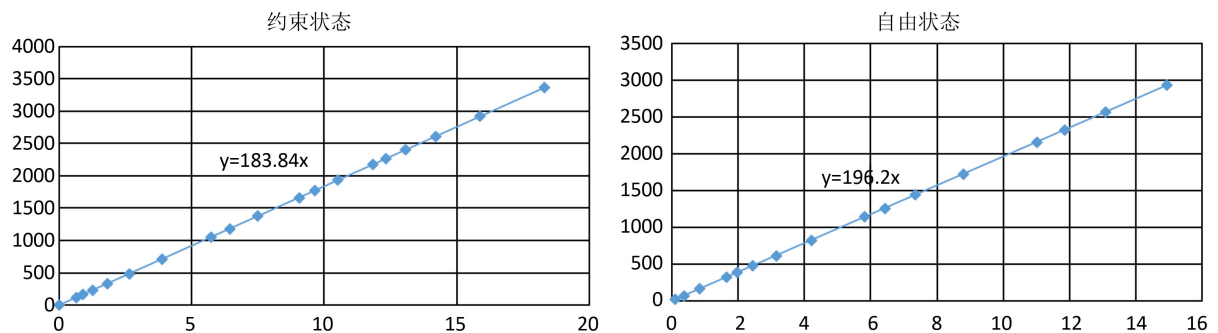


Figure 7. Radial stiffness of model built with section under free state or constrained state

图 7. 轮胎截面在自由状态下和约束状态下时所建模型的径向刚度

$$\text{径向刚度} = \frac{\text{径向载荷}}{\text{径向位移}} \quad (1)$$

从图 7 和表中可以看出使用在自由状态下的轮胎断面扫描得到的截面进行有限元分析得到的径向刚度更加接近实际。这是因为约束状态下的轮胎模型接地较小，呈椭圆形，与实际所要求的接地印迹有一定的区别，而自由状态下的接地印迹更为接近实际。

#### 4. 结论

从上述实验及仿真分析我们可以发现轮胎截面约束方式的不同会对有限元仿真的准确性造成很大的影响，因此得到更符合实际的断面模型至关重要。本文主要是以三个方面来验证轮胎截面约束方式的不同对有限元仿真的影响。对充气外轮廓来说，使用轮辋进行约束的轮胎截面更符合有限元分析的准确性。而对于接地印迹和径向刚度来说，使用约束状态下的轮胎截面进行有限元分析更加合理。综上所述，从性能的角度上说，使用自由状态下的轮胎截面更有利于有限元分析的准确性。

#### 参考文献

- [1] Nakajima, Y. (2011) Application of Computational Mechanics to Tire Design—Yesterday, Today, and Tomorrow. *Tire Science & Technology*, **39**, 223-244. <https://doi.org/10.2346/1.3670034>
- [2] Abe, A. (2000) Application of Optimization Technique into Tire Design. *Systems Control & Information*, **44**, 526-532.
- [3] 刘锋, 李丽娟, 杨学贵. 轮胎与地面接触问题的非线性有限元分析[J]. *应用力学学报*, 2001, 18(4): 141-146.
- [4] 彭赐龙, 陈希真, 罗从文. 军用汽车全钢载重子午线轮胎断面测绘及分析[J]. *军事交通学院学报*, 2011, 13(9): 49-52.
- [5] 谢雷, 曾启林, 黄勇章, 等. 轮胎断面结构测绘仪及测绘方法[P]. 中国专利, CN102305599A. 2012.
- [6] 刘巧霞. 轮胎断面自动测绘系统中的图像处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [7] 肖玉霜. 轮胎断面图像处理关键技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [8] 任洁雨. 子午线轮胎结构设计及其对力学特性影响研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [9] 梁晨. 子午线轮胎综合接地性能评价体系与方法研究[D]: [博士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2013.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-8696, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [mos@hanspub.org](mailto:mos@hanspub.org)