应用理论

# 轮胎转向残余回正力矩的有限元分析及 关键影响因素研究

## 孟照宏,史彩霞,翟明荣

(青岛双星轮胎工业有限公司,山东 青岛 266400)

摘要;针对轮胎带束层结构引起的转向残余回正力矩(PRAT)测试需要高精度专业设备,本研究基于Abagus有限元 分析软件并采用单一变量法对PRAT进行仿真分析并试验验证。多规格轮胎的分析表明:PRAT仿真结果与试验结果具 有较高的相关性;在此基础上研究的轮胎断面参数、花纹沟槽角度和使用工况对PRAT影响的结果对于轮胎跑偏问题分 析且有指导性,

关键词:轮胎:转向残余回正力矩:有限元分析:跑偏:单一变量法 中图分类号:TO336.1:O241.82 文献标志码:A

轮胎带束层结构引起的转向残余回正力矩 (Ply Steer Residual Aligning Torque, PRAT) 是 汽车直线跑偏调校过程中的关键考虑因素[1-3]。 在配套轮胎开发过程中,轮胎制造商经常需要按 照主机厂提出的调校要求进行优化设计,快速定 量表征和预测PRAT成为衡量配套轮胎商开发能 力的重要方面。同时,由于乘用车轮胎PRAT为 -5~5 N•m,要求测试设备精度高。目前国内轮 胎制造商尚未配置PRAT专用测试设备,致使其频 繁地将轮胎送往国外检测,测试成本高、周期长。

A.N. GENT等<sup>[4-9]</sup>对轮胎PRAT的试验数据开 展了多方面的研究,但对其有限元仿真分析研究 较少。本课题基于Abaqus有限元仿真分析软件 进行了轮胎PRAT仿真预测技术开发,并进行了实 际轮胎的试验验证。在此基础上,采用单一变量 法与有限元仿真相结合的方法对PRAT的关键影 如科学标识码

文章编号:1000-890X(2021)11-0822-05 DOI: 10. 12136/j. issn. 1000-890X. 2021. 11. 0822



响因素进行分析,探索关键结构参数和使用工况 对PRAT的影响规律,为改善轮胎跑偏性能提供 参考。

#### 1 PRAT计算原理

在侧偏角较小的范围内(即±2°或更小),轮胎 侧向力与侧偏角呈线性关系,回正力矩与侧偏角 呈现非线性关系<sup>[5-6,10]</sup>。对侧向力和回正力矩有限 元仿真数据分别进行线性和非线性回归拟合,然 后将两方程联立,即可求解PRAT值。

轮胎正转和反转下,侧向力和回正力矩与侧 偏角的拟合关系如下:

$$F_{\rm ycw} = a_1 X + a_2 \tag{1}$$

$$F_{\rm yccw} = a_3 X + a_4 \tag{2}$$

$$M_{\rm zcw} = b_1 X^3 + b_2 X^2 + b_3 X + b_4 \tag{3}$$

$$M_{\rm zccw} = b_5 X^3 + b_6 X^2 + b_7 X + b_8 \tag{4}$$

式中:Fvcw和Fvccw分别为轮胎正转和反转时的侧向 作者简介:孟照宏(1987--),男,山东青岛人,青岛双星轮胎工业有限公司工程师,硕士,主要从事轮胎力学特性的研究工作。

E-mail: mengzhaohong0703@163. com

引用本文:孟照宏,史彩霞,翟明荣.轮胎转向残余回正力矩的有限元分析及关键影响因素研究[J].橡胶工业,2021,68(11):822-826.

Citation: MENG Zhaohong, SHI Caixia, ZHAI Mingrong, Finite element analysis of tire PRAT and study on key influencing factors[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (11): 822-826.

力; *M*<sub>zew</sub>和*M*<sub>zecw</sub>分别为轮胎正转和反转时的回正力矩; *X*为轮胎侧偏角; *a*<sub>i</sub>和*b*<sub>j</sub>分别为无量纲侧向力和回正力矩的拟合因数, *i*与*j*均为整数, *i*取1~4, *j*取1~8。

将数据拟合可得,轮胎正转和反转的平均侧向力(F<sub>2</sub>)和平均回正力矩(<u>M</u>)为:

$$\overline{F_{y}} = \frac{a_{1} + a_{3}}{2}X + \frac{a_{2} + a_{4}}{2}$$
(5)

$$\overline{M_z} = \frac{b_1 + b_5}{2} X^3 + \frac{b_2 + b_6}{2} X^2 + \frac{b_3 + b_7}{2} X + \frac{b_4 + b_8}{2}$$
(6)

将 $\overline{F}_{s}$ =0时的侧偏角带入式(6),即可求得轮胎 PRAT。

## 2 有限元建模

为便于数据分析对比和模型调试,本研究基 于单一变量法建立两种类型的有限元分析模型, 即带纵向花纹主沟的光面轮胎和计及复杂花纹的 花纹轮胎。光面轮胎主要用于三维胎体结构参数 调整和使用工况对PRAT的影响研究,以消除轮胎 花纹对PRAT的影响,其模型直接在花纹轮胎建模 过程中由二维网格旋转形成。花纹轮胎主要用于 花纹结构参数调整对PRAT的影响研究,其建模流 程如图1所示。

为提高Abaqus计算收敛性,轮胎二维网格建 立过程中,使用单元节点与单元边线绑定的方式 避免三角形单元;四边形网格单元选用可压缩的 CGAX4类型;加强筋模型采用共节点面单元,类型



为SFMGAX1;胎面与三维胎体网格采用\*TIE命令 约束<sup>[11-15]</sup>。

## 3 多规格轮胎试验验证

#### 3.1 测试及仿真分析条件设定

按照GMW 15206—2007《Tire Residual Aligning Torque》,试验轮胎在美国史密斯实验室MTS Flat Trac SS试验台上进行PRAT测试,测试条件:环 境温度 21 ℃,充气压力 228 kPa,负荷 70% 标准负荷,行驶速度 3.6 km • h<sup>-1</sup>,偏角范围 -1°~+1°。

轮胎仿真设定条件为:充气压力和负荷与试验相同,滚动条件为无轴向约束的自由滚动,仿真时间 0.25 s,行驶速度 100 km • h<sup>-1</sup>,材料初始温度 40 ℃,模型质量缩放因数 1.05。

#### 3.2 仿真与试验结果对比

为验证有限元仿真结果,对多规格轮胎进行 了测试,轮胎花纹类型如图2所示,仿真与试验结



图2 轮胎花纹类型 Fig. 2 Patterns types of tires

表1	轮胎PRAT仿真与试验结果对比				
Tab. 1	Comparison of PRAT simulation and				
test results of tires					

北位米刑	+101 +/2	PRAT/	迟 举 /0/	
化纹矢型	7比1台 -	试验值	仿真值	- 庆左/ %
А	165/70R14	-2.31	-1.74	-24.7
А	185/65R15	-2.60	-1.95	-25.0
А	205/55R16	-2.34	-1.74	-25.6
В	195/60R15	-1.17	-0.83	-29.1
С	215/55R17	-2.67	-1.76	-34.1
С	235/65R17	-4.66	-3.52	-24.5
D	225/55R16	-2.80	-1.76	-37.1
Е	265/65R17	-6.64	-6.24	-6.0

从表1可以看出:虽然PRAT仿真值与试验值 之间的误差较大,但误差总体波动不大,这可能 是由轮胎设计结构与实际样胎结构之间的差异引 起的;将PRAT仿真值与试验值作相关性分析(见 图3)可以看出两者之间具有很高的相关性。



# 4 PRAT关键影响因素仿真分析

以205/55R16轮胎为例,仿真分析轮胎轮廓 和花纹等关键因素对PRAT的影响(调整前轮胎 PRAT为-1.06 N • m)。

#### 4.1 胎体结构

基于单一变量法,调整轮胎断面参数得到 PRAT仿真值如表2所示。

从表2可以看出:轮胎着合宽度对PRAT的影 响最大,带束层宽度次之,外直径影响最小;从行

#### 表2 轮胎断面参数对PRAT仿真值的影响 Tab. 2 Influence of tire layout parameters on PRAT simulation values

i kili simuluton vulues						
<b></b>	参数值	ī/mm	调整后PRAT/			
剧国参数	调整前	调整后	(N • m)			
外直径	630	640	-1.02			
断面宽	224	234	-1.14			
断面中心胎面厚度	7.5	6.5	-1.19			
行驶面高	5.7	7.4	-1.25			
上胎侧高占断面高比例	58 <sup>1)</sup>	54 <sup>1)</sup>	-1.16			
着合宽度	185.4	201.4	-1.39			
1 <sup>#</sup> 带束层宽度	176	166	-1.29			
三角胶高度	25	30	-1.19			

注:1)单位为%。轮胎仿真条件为充气压力 230 kPa,负荷 430.5 kg,行驶速度 100 km • h<sup>-1</sup>。

驶面高的影响来看,胎肩花纹块的接地性能对 PRAT也有较大影响。

为研究轮胎带束层角度对PRAT的影响,对 带束层角度进行了调整。当带束层角度取24°, 25°,26°,27°,28°和29°时,轮胎PRAT仿真值分别为 -1.23, -1.11, -1.06, -1.06, -1.07和-1.08  $N \cdot m_{\odot}$ 

从带束层角度对PRAT的影响可以看出,带 束层角度增大先使PRAT数值增大,带束层角度在 26°~27°时PRAT数值最小,之后PRAT数值随着带 束层角度的增大呈增大趋势,说明带束层角度变 化使胎冠接地面积发生变化,引起轮胎拖距发生 变化,进而对PRAT产生影响。

## 4.2 花纹结构

花纹对轮胎跑偏性能起着至关重要的作用, 其结构能够显著影响PRAT。对轮胎花纹模型进 行结构调整,即改变花纹沟槽角度 $\alpha$ , $\beta$ 和 $\gamma$ (见图 4),其PRAT仿真结果如表3所示。



图4 轮胎花纹模型 Fig. 4 Pattern model of tire

表3 花纹沟槽角度对轮胎PRAT的影响 Tab.3 Influence of pattern groove angles on PRAT of tires

边博布库		方	案	
闪帽用皮	1 <sup>1)</sup>	2	3	4
$\alpha^{2)}$	-1.74	-2.04	-2.09	-2.25
$\beta^{_{3)}}$	-1.74	-1.80	-1.83	-1.84
$\gamma^{4)}$	-1.74	-1.85	-1.88	-1.90

注:1)方案1为原设计方案;2)方案1,2,3,4的α(对应肩块1) 分别为14°,19°,24°,29°;3)方案1,2,3,4的β(对应中块2)分别为 37.9°,32.9°,27.9°,22.9°;4)方案1,2,3,4的γ(对应肩块3)分别为 40.5°,45.5°,50.5°,55.5°。

从表3可以看出:花纹块沟槽角度对PRAT影

响的大小顺序为肩块1的α,肩块3的γ,中块2的β; PRAT数值随着肩块1的α和肩块3的γ的增大而增 大,这主要是由于α和γ方向与2<sup>#</sup>带束层方向一致, 表明沟槽方向与2<sup>#</sup>带束层方向趋于一致时对PRAT 有增强效果;β增大时,PRAT数值也增大,但增大 幅度较小。

## 4.3 使用工况

为排除花纹对PRAT的影响,采用单一变量法 对光面轮胎充气压力、径向负荷、行驶速度和安装 侧倾角进行研究,仿真结果如表4所示。

表4 使用工况对轮胎PRAT的影响 Tab.4 Influence of operating conditions on PRAT of tires

Tab. 4Influence of operating conditions on PRAT of tires						N • m	
使用工用				方 案			
使用工优	а	b	с	d	e	f	g
充气压力1)	-1.17	-1.16	-1.12	-1.06	-1.00	-0.99	-0.96
径向负荷2)	-0.51	-0.70	-0.90	-1.06	-1.33	-1.60	-1.75
行驶速度3)	-0.80	-0.90	-1.01	-1.07	-1.06	-1.26	-1.40
安装侧倾角4)	20.24	13.79	6.57	-1.06	-8.83	-15.95	-22.51

注:1)方案a,b,c,d,e,f,g的充气压力分别为200,210,220,230,240,250,260 kPa;2)方案a,b,c,d,e,f,g的径向负荷率分别为40%, 50%,60%,70%,80%,90%,100%;3)方案a,b,c,d,e,f,g的行驶速度分别为20,40,60,80,100,120,140 km • h<sup>-1</sup>;4)方案a,b,c,d,e,f,g的 安装侧倾角分别为-3°,-2°,-1°,0°,1°,2°,3°。

从表4可以看出:随着充气压力的增大,轮胎 结构刚度增大,接地印痕面积减小,PRAT数值随 之减小;随着径向负荷的增大,轮胎接地印痕面积 增大,PRAT数值显著增大;随着行驶速度的提高, 轮胎PRAT数值呈增大趋势,但在80~100 km•h<sup>-1</sup> 区间PRAT数值变化不明显;当基于美国汽车工程 师协会(SAE)车辆坐标系的安装侧倾角由负值转 为正值时,PRAT变换方向,尤其是当安装侧倾角 为正值时,带束层角度效应与侧倾引起的回正力 矩叠加。由此可以得出,当轮胎使用工况使其整 体刚度增大和接地印痕面积减小时,PRAT数值呈 减小趋势。

#### 5 结论

跑偏是子午线轮胎运行过程中不可避免的 问题,采用有限元分析方法预测轮胎PRAT是可行 的,并能够为轮胎结构设计提供指导。

通过多规格轮胎的仿真与试验验证表明, PRAT与轮胎设计参数及使用工况具有很高的相 关性,主要表现为以下3点。 (1)轮胎断面参数对PRAT影响的大小排序顺 序为着合宽度、带束层宽度、行驶面高、三角胶高 度和断面中心胎面厚度、上胎侧高占断面高比例、 断面宽、断面中心厚度、外直径。

(2)轮胎花纹沟槽角度对PRAT影响的大小顺 序为肩块1的α、肩块3的γ、中块2的β,具体而言当 花纹节距与2<sup>#</sup>带束层角度方向一致时,肩块1沟槽 倾斜角度调整能够显著改变PRAT。

(3)使用工况引起轮胎整体刚度增大或接 地印痕面积减小时,PRAT数值呈减小趋势;安 装侧倾角导致轮胎印痕接地面积增大的一侧与 PRAT作用方向相同时,带束层角度效应将与侧 倾引起的回正力矩叠加,表现为增强轮胎跑偏 特性。

本研究仿真结果与试验结果之间误差较大, 下一步将开展材料特性和成品轮胎仿真建模方面 的研究,以进一步提高仿真精度。

#### 参考文献:

[1] 蒋祥建,黄家胜,杨欣雨,等. 主机厂对于跑偏关键要素的控制[J].

时代汽车,2019(8):121-124.

JIANG X J, HUANG J S, YANG X Y, et al. Control of key elements of deviation by main engine plant[J]. Auto Time, 2019 (8) : 121–124.

[2] 李及春,王秀冰.汽车行驶跑偏与轮胎生产[J].中外企业家,2013
 (18):173-174.

LI J C, WANG X B. Automobile running deviation and tire production[J]. Chinese and Foreign Entrepreneurs, 2013 (18) : 173–174.

- [3] 石磊. 整车跑偏原理和问题解决[J]. 汽车实用技术,2014(11):7-11.
   SHI L. Vehicle deviation principles and problem solving[J].
   Automobile Technology,2014(11):7-11.
- [4] GENT A N, WALTER J D. Pneumatic tire[M]. U. S. Washington D C: National Highway Traffic Safety Administration, 2005:335–343.
- [5] 卢荡,素艳茹. 基于曲线拟合的轮胎帘布层转向残余回正力矩计算 方法分析[J]. 轮胎工业,2016,36(4):195-198.
  LU D, SUO Y R. Analysis on calculation method of tire ply steer residual aligning torque based on curve fitting[J]. Tire Industry, 2016,36(4):195-198.
- [6] 邱昌峰,陈仁全,刘俊杰,等. 小侧偏角下轮胎残余回正力矩算法的研究[J]. 轮胎工业,2019,39(7):443-446.
  QIUCF, CHENRQ, LIUJJ, et al. Study on algorithm of tire residual aligning torque in small slip angle[J]. Tire Industry,2019,39 (7):443-446.
- [7] 성기득,박현만,구병국,등.정상 상태 롤링 해석 기법 적용을
   통한 타이어 패턴 형상에 따른 PRAT 특성 연구[J]. 한국자동차
   공학회논문집,2008,16(5):15-21.

- [8] 성기득,김성래,김기현,등.FEM을 이용한 타이어의 벨트각도에 따른 PRAT 및 코너링 특성 연구[J]. 한국정밀공학회지,2006,23
   (2):104-112.
- [9] 蒋庆君,韩潇,朱杰. 轮胎残余回正力矩与轮胎花纹沟设计之间的 关系[J]. 轮胎工业,2019,39(11):667-669.
  JIANG Q J,HAN X,ZHU J. Relationship between residual aligning torque and groove design of tire[J]. Tire Industry,2019,39(11):667-669.
- [10] YUKIO N. Advanced tire mechanics[M]. Tokyo: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019:1205–1207.
- [11] 叶树斌. 轮胎设计参数对侧偏特性影响分析[D]. 广州:华南理工 大学,2015.
- [12] 曾光,李子然,夏源明. 计及胎面花纹影响的轮胎侧偏特性有限元 分析[J]. 中国科学技术大学学报,2013,43(6):497-502.
  ZENG G, LI Z R, XIA Y M. Finite element analysis for tire cornering characteristics with tread pattern effects[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2013,43(6):497-502.
- [13] 曾光. 计及胎面花纹影响的轮胎侧偏显式有限元分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学,2009.
- [14] 吴福麒. 轮胎稳态滚动温度场的有限元分析[D]. 合肥:中国科学 技术大学,2009.
- [15] RAFEI M, GHOREISHY M H R, NADERI G. Thermo-mechanical coupled finite element simulation of tire cornering characteristics— Effect of complex material models and friction law[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018 (144) :35–51.

收稿日期:2021-05-07

# Finite Element Analysis of Tire PRAT and Study on Key Influencing Factors

MENG Zhaohong, SHI Caixia, ZHAI Mingrong (Qingdao Doublestar Tire Industry Co., Ltd, Qingdao 266400, China)

**Abstract**: As the test of ply steer residual aligning torque (PRAT) caused by the belt structure required high-precision and professional equipment, this research carried out simulation analysis of PRAT using the finite element analysis software Abaqus and single variable method, and gave test verification. The analysis of various specification tires showed that the PRAT simulation results had a high correlation with the test results. Based on this, it was found that the main factors influencing the tire PRAT were tire layout parameters, pattern groove angles and operating conditions, and the influence of those key factors provided valuable reference for the analysis of steering problems.

Key words: tire; PRAT; finite element analysis; steering problem; single variable method