

215/75R22.5全钢载重子午线轮胎 接地印痕的仿真优化

张伟伟, 张永锋, 张梦洁

[浦林成山(青岛)工业研究设计有限公司, 山东 青岛 266042]

摘要:以215/75R22.5全钢载重子午线轮胎为研究对象,基于试验设计法对轮胎接地印痕进行仿真优化。结果表明:以加权形状因数(C_w)为优化目标,优化后轮胎的仿真接地印痕基本呈矩形,优化效果理想;胎冠弧高度是影响 C_w 的最显著因子。

关键词:全钢载重子午线轮胎;接地印痕;DOE;优化;有限元仿真

中图分类号:TQ336.1;U463.341⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1006-8171(2024)04-0245-05

DOI:10.12135/j.issn.1006-8171.2024.04.0245



轮胎接地印痕直接影响轮胎的干湿地抓着力、噪声和耐磨性能,已受到车辆、轮胎企业的广泛关注^[1-5]。目前,轮胎接地印痕的有限元仿真已经普遍应用于轮胎开发中^[6-10]。试验设计法(简称DOE)可以同时考察多个变量对目标函数的影响,具有开发周期短、成本低的特点^[11-12]。

本工作以我公司新开发的215/75R22.5全钢载重子午线轮胎为研究对象,采用DOE与有限元仿真相结合的方法,以实现轮胎接地印痕的优化。

1 优化前轮胎接地印痕

试验测得优化前轮胎接地印痕如图1所示。



图1 优化前轮胎接地印痕

作者简介:张伟伟(1986—),女,山东聊城人,浦林成山(青岛)工业研究设计有限公司工程师,学士,主要从事轮胎有限元仿真的研究工作。

E-mail:wwzhang@prinxchengshan.com

从图1可以看出,优化前轮胎接地印痕肩部出现尖角,肩部区域未达到理想形状。因此,需要在开发新模具之前对轮胎进行结构优化,从而使其接地印痕达到理想形状。

2 优化设计

2.1 优化变量

本工作轮胎接地印痕量化指标(简称印痕指标)如图2所示,分别为接地印痕长轴长度(X_{CL})、短轴长度(W_{CL})、80%胎肩长度($S_{L0.8}$)和95%胎肩长度($S_{L0.95}$);轮胎接地印痕形状由两个参数表征,分别为接地印痕形状因数(C_s)和肩部形状因数(C_{ss}), C_s 为 X_{CL} 与 $S_{L0.8}$ 的比值,代表轮胎接地印痕的矩形率^[13], C_s 大于1时接地印痕呈椭圆形,小于1时呈凹型,等于1时呈矩形; C_{ss} 为 $S_{L0.95}$ 与 $S_{L0.8}$ 的比值,代表轮胎肩部形状, C_{ss} 大于1或小于1时,肩部花纹块接地印痕呈梯形,等于1时呈矩形。

2.2 优化目标

为了使优化目标单一化,将 C_s 和 C_{ss} 加权计算得到加权形状因数(C_w),以 C_w 为优化变量,计算式为

$$C_w = 0.4C_s + 0.6C_{ss}$$

C_w 越接近1,轮胎接地印痕越接近矩形,形状越理想,因此,本工作接地印痕的优化目标为 $0.98 < C_w < 1.02$ 。

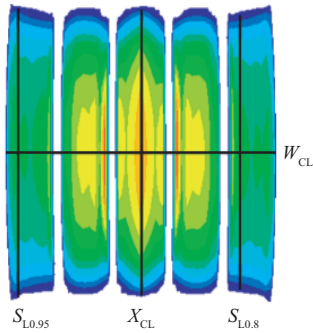


图2 轮胎印痕指标示意

2.3 优化过程

2.3.1 DOE设计

选用影响轮胎接地印痕形状的关键设计参数进行正交设计,设计参数分别为第1段胎冠弧半径 R_1 (A)、第2段胎冠弧半径 R_2 (B)、胎冠弧高度 h (C)、带束层宽度 W_B (D)和肩部厚度 H_T (E),如图3所示。

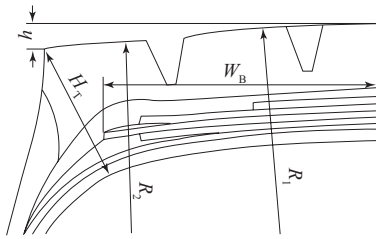


图3 设计参数示意

根据设计要求确定设计参数的水平范围,确定DOE设计为5因子4水平(见表1),使用 $L_{16}(4^5)$ 的正交设计表,如表2所示。

表1 DOE设计的因子和水平					
水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	500	260	7	146	35
2	600	350	8	152	36
3	700	450	9	158	37
4	800	600	10	164	39

2.3.2 DOE仿真试验

选用Abaqus软件进行轮胎的充气 and 加载分析,充气压力为850 kPa,径向负荷为2 180 kg。选用Yeoh本构模型对橡胶材料进行描述,用Rebar单元定义骨架材料,各试验方案仿真模型网格密度保持一致。根据仿真经验,花纹横沟和细小钢片对轮胎接地印痕仿真结果的影响较小,为节约计

表2 正交设计表

试验方案	因子				
	A	B	C	D	E
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4
5	2	1	2	3	4
6	2	2	1	4	3
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	4
12	3	4	2	1	3
13	4	1	4	2	3
14	4	2	3	1	4
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

算成本,本工作有限元模型只考虑花纹纵沟。

3 结果与讨论

3.1 DOE仿真结果

轮胎印痕指标DOE仿真结果如表3所示。

3.2 极差分析法

各因子对轮胎印痕指标影响的极差法分析结果如表4所示。极差大小反映该列因子的水平变动对各印痕指标影响的大小,根据极差可定出因子的主次,极差大对印痕指标的影响大,为主要因子;极差小对印痕指标的影响小,为次要因子。轮胎接地印痕各因子的影响主次如表5所示。

从表5可以看出:对于各印痕指标,各因子的影响程度不同;因子 A 为 X_{CL} 的最显著因子;因子 C 为 W_{CL} 的最显著因子;因子 B 为 $S_{L0.8}$ 的最显著因子;因子 C 为 $S_{L0.95}$ 的最显著因子;因子 D 为 C_s 的最显著因子;因子 C 为 C_{SS} 和 C_w 的最显著因子。

3.3 响应图分析法

为直观起见,采用因子及其水平为横坐标,印痕指标平均值为纵坐标,各印痕指标的主效应图如图4所示。

从图4可以看出: X_{CL} 的主要因子为 A 和 D ; W_{CL} 的主要因子为 C 和 E , $S_{L0.8}$ 的主要因子为 B 和 D ; $S_{L0.95}$ 的主要因子为 C 和 E ; C_s 的主要因子为 D 和 B ,但其

表3 轮胎印痕指标DOE仿真结果							
试验方案	X_{CL}/mm	W_{CL}/mm	C_S	$S_{L0.8}/mm$	$S_{L0.95}/mm$	C_{SS}	C_W
1	163.38	180.75	1.11	146.98	116.43	1.26	1.20
2	164.68	181.98	1.17	140.33	109.90	1.28	1.23
3	164.93	179.63	1.19	138.40	103.88	1.33	1.28
4	165.06	177.13	1.21	136.81	91.11	1.50	1.39
5	162.86	180.88	1.08	150.31	112.01	1.34	1.24
6	165.59	184.34	1.19	139.71	118.37	1.18	1.18
7	161.16	167.16	1.11	145.59	94.36	1.54	1.37
8	164.28	175.27	1.21	135.27	83.67	1.62	1.45
9	164.57	171.32	1.19	138.78	92.11	1.51	1.38
10	163.15	163.15	1.10	147.83	88.64	1.67	1.44
11	156.68	185.28	1.03	151.48	124.17	1.22	1.14
12	158.05	183.85	1.12	140.96	109.02	1.29	1.22
13	157.85	166.12	1.03	152.83	101.39	1.51	1.32
14	157.49	174.25	1.09	144.91	81.74	1.77	1.50
15	162.55	171.14	1.18	138.02	89.86	1.54	1.39
16	159.11	181.01	1.15	138.82	100.49	1.38	1.29

表4 各因子对轮胎印痕指标影响的极差法分析结果					
印痕指标	因子				
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
X_{CL}/mm	5.26	1.40	1.63	4.42	2.82
W_{CL}/mm	4.55	4.56	14.46	1.18	6.81
$S_{L0.8}/mm$	4.13	9.26	6.42	6.65	5.00
$S_{L0.95}/mm$	11.96	9.41	24.52	6.92	13.52
C_S	0.060	0.070	0.057	0.085	0.053
C_{SS}	0.206	0.070	0.296	0.063	0.193
C_W	0.101	0.056	0.198	0.049	0.123

表5 轮胎接地印痕各因子的影响主次					
印痕指标	各因子的影响主次 ¹⁾				
X_{CL}/mm	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>C</i>	<i>B</i>
W_{CL}/mm	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>D</i>
$S_{L0.8}/mm$	<i>B</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>A</i>
$S_{L0.95}/mm$	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
C_S	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>E</i>
C_{SS}	<i>C</i>	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>D</i>
C_W	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>

注:1)从左向右影响依次减小。

余各因子影响也比较明显; C_{SS} 的主要因子为*C*和*A*; C_W 的主要因子为*C*和*E*。

从图4还可以看出,因子对印痕指标的影响并不是单调增大或减小,需要寻找最佳的因子和水

平的组合。

由于 C_W 越接近1,接地印痕形状越接近矩形,从图4(g)可以看出,轮胎接地印痕因子和水平的最优组合为*A1B1C1D2E3*,最优设计参数为:*A* 500 mm,*B* 260 mm,*C* 7 mm,*D* 152 mm,*E* 37 mm。

3.4 优化方案的验证

根据优化后的参数组合重新绘制轮胎材料分布图,并进行轮胎接地印痕的仿真验证。优化前的轮胎仿真接地印痕如图5所示,轮胎印痕指标仿真结果对比如表6所示。

从图1和5及表6可以看出:优化前轮胎接地印痕实测结果和仿真结果一致,间接验证了仿真模型的可靠性;优化后轮胎的仿直接地印痕基本呈矩形(胎肩处尖角消失, C_W 为0.99),优化效果理想。

4 结论

(1)以 C_W 为接地印痕优化目标,优化目标单一,优化后轮胎的仿直接地印痕基本呈矩形,优化效果理想。

(2)因子*C*是影响 C_W 的最显著因子。

(3)DOE与有限元仿真相结合的方法对多因子多目标下的轮胎结构优化具有较大的指导意义。

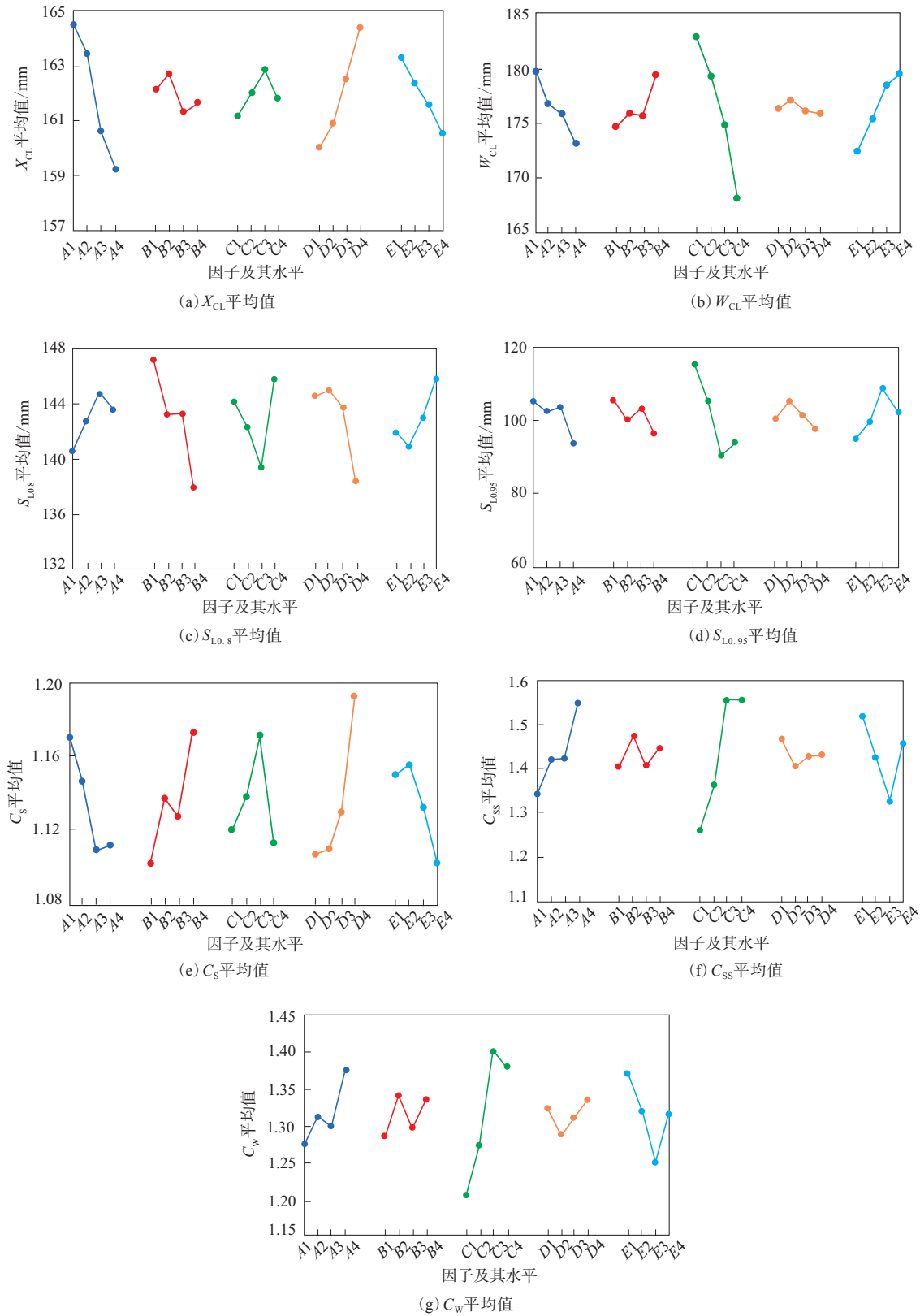


图4 各印痕指标的主效应图

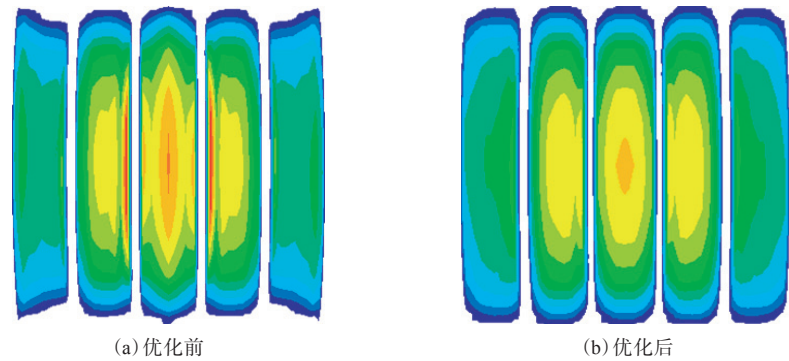


图5 优化前后的轮胎仿真接地印痕

表6 优化前后轮胎印痕指标仿真结果对比

方 案	X_{CL}/mm	W_{CL}/mm	C_S	$S_{L0.8}/\text{mm}$	$S_{L0.95}/\text{mm}$	C_{SS}	C_W
原方案	187.43	184.46	1.09	172.01	179.72	1.04	1.06
优化方案	179.56	185.78	1.01	177.39	172.73	0.97	0.99

参考文献:

[1] 陈幸鹏. 轮胎湿抓地性能数值分析方法及评价指标研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.

[2] ZHANG Z F, FU H X, LIANG X M, et al. Comparative analysis of static and dynamic performance of nonpneumatic tire with flexible spoke structure[J]. Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66 (7-8): 458-466.

[3] 张文杰, 王锐佳, 雍占福, 等. 基于Abaqus软件的12. 00R24全钢工程机械轮胎接地印痕的优化[J]. 轮胎工业, 2022, 42 (7): 399-402.

[4] 柏林, 梁晨, 朱大轩, 等. 轮胎动态接地压力分布的光吸收法测量研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69 (10): 723-731.

[5] 刘坤, 王君, 曲宾建, 等. 轿车轮胎操纵稳定性设计因素相关性研究[J]. 轮胎工业, 2023, 43 (9): 521-524.

[6] 王宁宁. 子午线轮胎径向接地特性试验与仿真研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2023.

[7] 何菁, 王兆龙, 张凯凯, 等. 利用有限元方法研究轮廓参数对轮胎性能的影响[J]. 橡胶科技, 2023, 21 (4): 169-173.

[8] 胡德斌, 李进, 郭磊磊. 轮胎接地印痕与设计因素的相关性研究[J]. 轮胎工业, 2023, 43 (3): 138-143.

[9] 傅相诚, 张伟伟, 车明明, 等. 基于Abaqus的轮胎接地印痕优化分析[J]. 轮胎工业, 2019, 39 (6): 330-333.

[10] 侯丹丹, 徐晓鹏, 张春生, 等. 全钢载重子午线轮胎接地压力分布的仿真研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69 (4): 261-267.

[11] 彭雪梅. 基于NSGA-Ⅲ算法的商用车驾驶室多目标优化设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.

[12] 李娅娜, 孟迪. 考虑静态多目标地铁车座椅拓扑优化设计研究[J]. 大连交通大学学报, 2022, 43 (1): 27-31.

[13] 张伟伟, 王海艳, 任世夺, 等. 基于Abaqus的全钢轮胎接地印痕仿真分析[J]. 橡胶科技, 2021, 19 (1): 11-14.

收稿日期: 2023-12-07

Simulation Optimization of Footprint of 215/75R22. 5 All-steel Truck and Bus Radial Tire

ZHANG Weiwei, ZHANG Yongfeng, ZHANG Mengjie

[Prinxchengshan (Qingdao) Industrial Research and Design Co., Ltd, Qingdao 266042, China]

Abstract: Taking 215/75R22. 5 all-steel truck and bus radial tire as the research object, simulation optimization of tire footprint was carried out based on the experimental design method. The results showed that, with weighted shape factor (C_W) as the optimization objective, the simulated footprint of the optimized tire was basically rectangular, and the optimization effect was ideal. Crown arc height was the most significant factor affecting C_W .

Key words: all-steel truck and bus radial tire; footprint; DOE; optimization; finite element simulation