

# 航空轮胎胎坯径向均匀性建模分析

于海勇, 韩聪聪, 郑植, 田仲可  
(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:**采用Creo三维软件对720×320航空轮胎胎坯进行建模与运动学模拟,采集由于部件搭接误差和接头定点分布偏移产生的胎坯径向力波动数据,利用Design-Expert软件进行响应面分析,获得胎坯成型过程中部件贴合测控数学模型。研究表明:不同速度下,部件搭接误差和接头定点分布偏移与胎坯径向力波动之间的关系用四阶响应面方程表示,方程的拟合效果最佳;对胎坯径向力波动影响较大的因素是胎面长度平方和左胎侧长度平方与带束层长度平方乘积等。

**关键词:**航空轮胎;胎坯;径向均匀性;接头;响应面分析;运动学模拟

**中图分类号:**TQ336.1<sup>+</sup>1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-890X(2020)05-0341-05

**DOI:**10.12136/j.issn.1000-890X.2020.05.0341



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

航空轮胎使用时面临高速、重载、大冲击的环境,因此对均匀性要求较高。均匀性是指在静态和动态条件下轮胎圆周特性的稳定性。轮胎的设计和生 产都会对其均匀性产生影响,尤其是在生产过程中半成品部件结构和尺寸、成型工艺、硫化工艺对轮胎均匀性影响较大<sup>[1]</sup>。成型工艺过程中带束层、胎面和胎侧缠绕在成型鼓上时,会产生搭接误差和接头定点分布偏移,使轮胎转动时产生径向力波动,导致轮胎运动不稳定,对航空交通运输工具的使用造成安全隐患。搭接误差和接头定点分布偏移在轮胎硫化前就已产生,而硫化前胎坯各部件之间贴合不 稳定,很难使用现有的均匀性测量仪器对胎坯进行径向力波动测量与分析,往往都是将硫化后的成品轮胎放入均匀性检测设备中进行均匀性检测,该检测步骤繁琐、成本高<sup>[2-6]</sup>。轮胎均匀性检测主要包括径向力波动、侧向力波动、锥度效应、角度效应、径向尺寸偏差及侧向尺寸偏差。

1997年,马金林<sup>[7]</sup>提出将胎体以45°角进行贴合,以提高轮胎均匀性。2005年,鲍旭清<sup>[8]</sup>提出在成型工艺阶段采取减小胎面、胎侧、三角胶尺寸偏差和提高裁断精度,合理设定成型工艺参数及各

**作者简介:**于海勇(1995—),男,山东临沂人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事机械工程领域智能制造数值模拟与算法开发研究。

**E-mail:**949852761@qq.com

部件材料定点分布等一些列措施来提高轮胎均匀性。2015年,夏淑文<sup>[9]</sup>研究了成型工艺对轮胎均匀性的影响,指出轮胎接头量过大和过小时,轮胎径向力波动最大的位置均集中于胎面接头处。2017年,赵成忠等<sup>[10]</sup>提出胎面接头位于胎面传递环上方、胎面正常长度减小10 mm、胎面传递环瓦块尺寸与胎坯直径差异较小等措施有利于减小轮胎径向力波动,提高均匀性。

本工作采用Creo三维软件对720×320航空轮胎胎坯进行建模与运动学模拟,采集由于部件搭接误差和接头定点分布偏移产生的径向力波动数据,利用响应面分析技术为航空轮胎在生产过程中部件贴合测控提供可靠的数学模型。

## 1 贴合误差分析

本工作研究在120,160和180 km·h<sup>-1</sup>速度下轮胎部件搭接误差和接头定点分布偏移与胎坯径向力波动之间的关系。为了简化起见,采用1条带束层、1条左胎侧、1条右胎侧和1条胎面来模拟成型贴合的情况。720×320航空轮胎胎坯基本参数如表1所示,胎面截面如图1所示。

贴合误差仅考虑两种。第1种为搭接长度误差,包括带束层搭接长度误差、左右胎侧搭接长度误差和胎面搭接长度误差。带束层搭接长度误差范围为-15~0 mm,左右胎侧与胎面的搭接长度误差范围为-15~+15 mm。搭接长度误差为负

表1 胎坯基本参数 mm

部件	厚度	宽度	长度
带束层	2	170	1 413.72
左胎侧	2	147.5	1 413.72
右胎侧	2	147.5	1 413.72
胎面		170	1 426.28

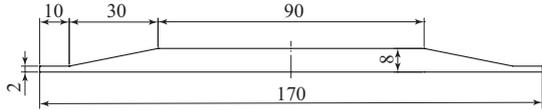
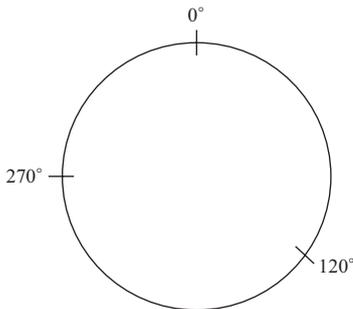


图1 胎面截面示意

表示搭接长度不足,搭接长度误差为零表示刚好贴合一周,搭接长度误差为正表示搭接长度较长。

第2种为接头定点分布偏移,理想接头分布如图2所示,接头定点分布偏移包括左右胎侧接头相对带束层接头定点分布偏移和胎面接头相对带束层接头定点分布偏移。接头定点分布偏移范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 。



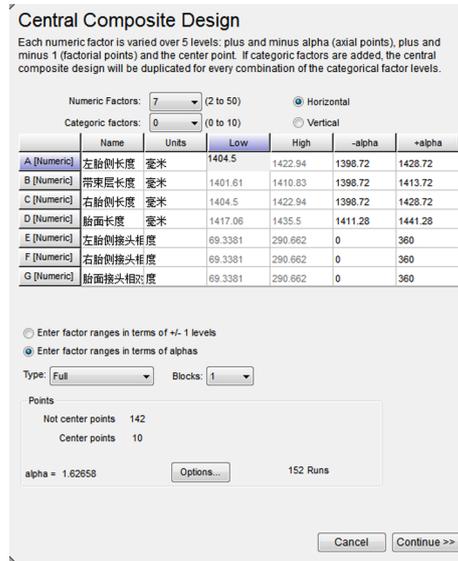
0°—胎面接头;120°—胎侧接头;270°—带束层接头。

图2 胎坯理想接头定点分布示意

## 2 模型数据的生成

Design-Expert是一款试验设计软件,在响应面建模分析中应用广泛。将上述分析的误差输入到Design-Expert中的中心复合设计(Central Composite Design)模块<sup>[11]</sup>,可以生成152组模型数据,如图3所示。

中心复合设计是在二水平全因子和分布试验设计的基础上发展出来的一种试验设计方法。通过对二水平试验增加1个设计点,从而可以对评价指标(输出变量)与因子间的非线性关系进行评估,常用于对因子的非线性影响进行测试的试验。



(a) 模型参数定义

Std	Run	Factor 1 A 左胎侧长度 毫米	Factor 2 B 带束层长度 毫米	Factor 3 C 右胎侧长度 毫米	Factor 4 D 胎面长度 毫米	Factor 5 E 左胎侧接 度	Factor 6 F 右胎侧接 度	Factor 7 G 胎面接头 度
152	1	1413.72	1406.22	1413.72	1426.28	180	180	180
75	2	1404.5	1410.83	1404.5	1435.5	69.3381	69.3381	290.662
115	3	1404.5	1410.83	1404.5	1417.06	290.662	290.662	290.662
136	4	1413.72	1406.22	1413.72	1441.28	180	180	180
93	5	1404.5	1401.61	1422.94	1435.5	290.662	69.3381	290.662
138	6	1413.72	1406.22	1413.72	1426.28	360	180	180
24	7	1422.94	1410.83	1422.94	1417.06	290.662	69.3381	69.3381
50	8	1422.94	1401.61	1404.5	1417.06	290.662	290.662	69.3381
23	9	1404.5	1410.83	1422.94	1417.06	290.662	69.3381	69.3381
94	10	1422.94	1401.61	1422.94	1435.5	290.662	69.3381	290.662
84	11	1422.94	1410.83	1422.94	1435.5	290.662	290.662	69.3381
114	12	1422.94	1401.61	1404.5	1417.06	290.662	290.662	290.662
107	13	1404.5	1410.83	1404.5	1435.5	69.3381	290.662	290.662
105	14	1404.5	1401.61	1404.5	1435.5	69.3381	290.662	290.662
30	15	1422.94	1401.61	1422.94	1435.5	290.662	69.3381	69.3381
86	16	1422.94	1401.61	1404.5	1417.06	69.3381	69.3381	290.662
56	17	1422.94	1410.83	1422.94	1417.06	290.662	290.662	69.3381
26	18	1422.94	1401.61	1404.5	1435.5	290.662	69.3381	69.3381
96	19	1422.94	1410.83	1422.94	1435.5	290.662	69.3381	290.662
85	20	1404.5	1401.61	1422.94	1417.06	290.662	69.3381	290.662
87	21	1404.5	1410.83	1422.94	1417.06	290.662	69.3381	290.662
99	22	1404.5	1410.83	1404.5	1417.06	69.3381	290.662	290.662
55	23	1404.5	1410.83	1422.94	1417.06	290.662	290.662	69.3381
8	24	1422.94	1410.83	1422.94	1417.06	69.3381	69.3381	69.3381
143	25	1413.72	1406.22	1413.72	1426.28	180	180	180
76	26	1422.94	1410.83	1404.5	1435.5	69.3381	69.3381	290.662

(b) 部分因子组合

图3 模型参数定义及生成界面

## 3 运动学模型构建及仿真

按照生成的152组模型数据,使用Creo软件构建出轮胎胎坯模型。为进行胎坯的运动模拟和径向力测量,构建出成型鼓、轴和基座模型。装配过程中定义基座为刚性固定,轴与基座为销连接,成型鼓的孔与轴为重合装配<sup>[12]</sup>,总装配模型如图4所示。

对装配后的模型定义密度、重力加速度、转速等初始条件,对胎坯进行运动模拟,并对其径向力进行测量定义,如图5所示,其中主体2为成型鼓。

胎坯径向力测量结果输出界面如图6所示。在图6中点击左上角“根据选定结果集绘制选定测

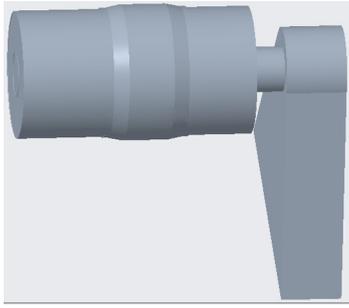


图4 总装配模型



图5 胎坯径向力测量定义界面

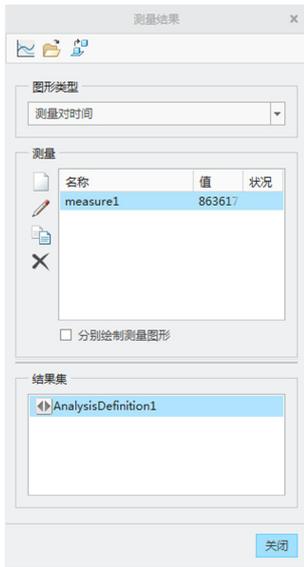


图6 胎坯径向力测量结果输出界面

量”的图标,得到如图7所示的胎坯径向力波动曲线,点击文件下的“导出Excel”可以得到一系列离散点。对模型进行仿真分析,得到不同速度下的胎坯径向力波动结果,如图8所示。

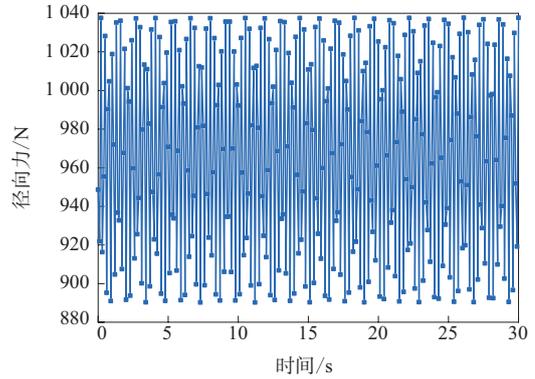


图7 胎坯径向力波动曲线

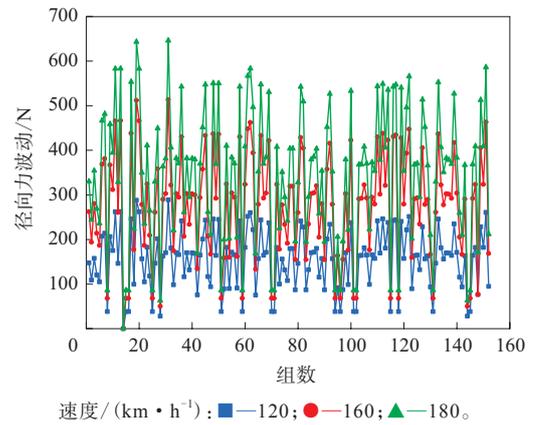


图8 胎坯径向力波动统计

#### 4 径向力波动响应面分析

响应面法研究试验中多输入与输出之间的关系,适宜解决非线性数据处理问题。响应面法将复杂的未知函数关系在小区域内用简单的多项式模型来拟合。将Creo软件模拟测得的152组不同速度下的轮胎胎坯径向力波动数据依次导入Design-Expert软件对应的数据栏,并采用四阶模型进行响应面分析,拟合结果如表2所示。

表2 拟合结果

速度/(km·h <sup>-1</sup> )	标准差	方差(R <sup>2</sup> )	显著性(F)	平均值
120	17.67	0.982 9	19.28	153.94
160	31.39	0.983 0	19.50	273.31
180	39.79	0.982 7	19.15	346.04

胎坯径向力波动残差正态分布分析表明,离散点与预期直线十分接近,即胎坯径向力波动预测值与真实值分布在直线两侧,表明模型可靠。

速度120,160,180 km·h<sup>-1</sup>对应的胎坯径向力(f)波动四阶响应面方程分别为式(1),(2)和(3)。

$$f=38.13+23.62A-23.45B+23.63C+25.14D+4.92AC+5.57AD+4.68BC+6.40BD+3.67BE+3.88DG+10.71A^2+10.71C^2+79.36D^2-3.92ABC+3.27ACD+3.95ADE+4.08BDE-3.51BDG-15.93A^2B-29.94A^2C-25.57A^2D-27.35AB^2-5.09ABCD-4.69ACEG+31.73ADEG+32.56CDFG+32.58A^2B^2 \quad (1)$$

$$f=67.79+41.98A+41.99C+44.65D+8.74AC+9.92AD+8.34BC+11.41BD+6.53BE+6.89DG+19.04A^2+19.05C^2+141.07D^2-6.96ABC+5.80CD+7.02ADE+7.25BDE-6.23BDG-53.21A^2C-45.36A^2D-48.61AB^2-9.04ABCD-8.32ACEG+56.39ADEG+57.90CDFG+69.15A^2B^2 \quad (2)$$

$$f=85.65+53.01A-52.55B+52.91C+55.61D+10.29AC+13.34AD+11.24BC+13.71BD+8.86BE+7.50DG+24.07A^2+23.98C^2+177.82D^2-9.45ABC+8.17ACD+9.62ADE+8.24BDE-8.61BDG+7.48CFG+36.62A^2B-66.27A^2C-57.07A^2D-62.12AB^2-10.46ABCD-7.57ABFG-11.06ACEG+72.26CDFG+74.04A^2B^2 \quad (3)$$

式中,  $A$ 为左胎侧长度,  $B$ 为带束层长度,  $C$ 为右胎侧长度,  $D$ 为胎面长度,  $E$ 为左胎侧接头相对带束层接头定点分布偏移,  $F$ 为右胎侧接头相对带束层接头定点分布偏移,  $G$ 为胎面接头相对带束层接头定点

分布偏移。

以上胎坯径向力响应面方程中的变量对应编码值而非真实值, 对应的转换按表3所示进行线性插值。

表3 胎坯径向力响应面方程变量的真实值与编码值对应表

变量	I		II		III		IV	
	真实值	编码值	真实值	编码值	真实值	编码值	真实值	编码值
$A$	1 398.72	-1.626 8	1 404.50	-1	1 422.94	+1	1 428.72	+1.626 8
$B$	1 398.72	-1.626 8	1 401.61	-1	1 410.83	+1	1 413.72	+1.626 8
$C$	1 398.72	-1.626 8	1 404.50	-1	1 422.94	+1	1 428.72	+1.626 8
$D$	1 411.28	-1.626 8	1 417.06	-1	1 435.50	+1	1 441.28	+1.626 8
$E$	0	-1.626 6	69.34	-1	290.66	+1	360	+1.626 6
$F$	0	-1.626 6	69.34	-1	290.66	+1	360	+1.626 6
$G$	0	-1.626 6	69.34	-1	290.66	+1	360	+1.626 6

从式(1)~(3)可以看出:单因素中,胎面长度平方( $D^2$ )和胎面长度( $D$ )对轮胎胎坯径向力波动影响较大;交互因素中左胎侧长度平方与带束层长度平方乘积( $A^2B^2$ ),右胎侧长度、胎面长度及右胎侧接头相对带束层接头定点分布偏移和胎面接头相对带束层接头定点分布偏移的乘积( $CDFG$ ),左胎侧长度、胎面长度及左胎侧接头相对带束层接头定点分布偏移和胎面接头相对带束层接头定点分布偏移的乘积( $ADEG$ ),左胎侧长度平方与右胎侧长度的乘积( $A^2C$ ),左胎侧长度与胎面长度平方的乘积( $AB^2$ ),左胎侧长度平方与胎面长度的乘积( $A^2D$ )对轮胎胎坯径向力波动影响较大。

## 5 结论

使用Creo三维软件对720×320航空轮胎胎坯模型在3种不同速度下进行模拟仿真,测得相应的胎坯径向力波动数据,采用Design-Expert软件进

行响应面分析,得到如下结论。

(1)不同速度下,搭接误差和接头定点分布偏移与胎坯径向力波动之间的关系用四阶响应面方程来表示,方程的拟合效果最佳,可为轮胎生产过程中部件贴合测控提供可靠的数学模型。

(2)对胎坯径向力波动影响较大的因素是胎面长度平方和左胎侧长度平方与带束层长度平方乘积等。

本研究仅建立了部件搭接误差和接头定点分布偏移与轮胎胎坯径向力波动之间的数学模型,下一阶段需要建立胎坯径向力波动与成品轮胎径向力波动关系的数学模型,以期最终建立搭接误差和接头定点分布偏移与成品轮胎径向力波动之间的数学模型。

## 参考文献:

- [1] 余双玉. 轮胎均匀性及其影响因素[J]. 轮胎工业, 2008, 28(8): 463-469.

- [2] 王晓明, 杨梅胜. 轮胎均匀性的在线测试方法和系统[J]. 橡胶工业, 2005, 52(7): 432-435.
- [3] 卢忠宇. 轮胎均匀性测试设备优化设计[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
- [4] 纪琼蕾. 基于工艺的轮胎硫化及均匀性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- [5] 吴长清, 吴纯哲. 全钢载重子午线轮胎成型工艺与质量控制[J]. 轮胎工业, 2007, 27(4): 238-244.
- [6] 管西刚. 轮胎均匀性试验机算法解算和控制方法的研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2006.
- [7] 马金林. 提高子午线轮胎均匀性的新途径[J]. 轮胎工业, 1997, 17(10): 579-582.
- [8] 鲍旭清. 提高半钢子午线轮胎均匀性的措施[J]. 轮胎工业, 2005, 25(4): 230-235.
- [9] 夏淑文. 成型工艺对半钢子午线轮胎均匀性的影响[J]. 橡胶科技, 2015, 13(12): 35-38.
- [10] 赵成忠, 李培军, 崔莉, 等. 全钢载重子午线轮胎成型工艺对轮胎径向力波动的影响[J]. 轮胎工业, 2017, 37(7): 428-431.
- [11] 葛宜元, 梁秋燕, 王桂莲, 等. 试验设计方法与Design-Expert软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [12] 伍明. 中文版Creo 3.0技术大全[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.

收稿日期: 2019-12-24

## Modeling and Analysis on Radial Uniformity of Green Tire of Aircraft Tire

YU Haiyong, HAN Congcong, ZHENG Zhi, TIAN Zhongke

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** In this study, modeling and kinematic simulating of the 720×320 green tire of aircraft tire was carried out by using three-dimensional software Creo. The data of the radial force fluctuation of the green tire caused by the lapping error of the components and the distribution offset of the fixed joints were collected. The response surface analysis was carried out by using Design-Expert software, and the mathematical model of measurement and control of components lamination in the building process of the green tire was obtained. The results showed that the relationship between the lapping error of the components and the distribution offset of the fixed joints and the radial force fluctuation of the green tire was expressed by the fourth-order response surface equation, which gave the best fitting results. The factors that significantly influenced the radial force fluctuation of the green tire were the square of the tread length, the product of the square of the left sidewall length and the square of the belt length, and so on.

**Key words:** aircraft tire; green tire; radial uniformity; joint; response surface analysis; kinematics simulation

**朗盛开发植物基橡胶助剂** 2020年3月2日, 朗盛公司宣布其加工助剂产品Aktiplast PP系列增添的植物基新产品可广泛应用于轮胎和各种工业橡胶制品。

据悉, 新产品Aktiplast PP-veg基于可再生原料, 是专为满足亚洲客户的需求而开发的。朗盛莱茵化学业务部旨在借此帮助客户减小二氧化碳的排放量。目前, 一家欧洲的国际知名轮胎制造商已对此表示出极大的兴趣。据介绍, 与传统产品不同, Aktiplast PP-veg完全由植物油制成,

其中可再生原料的比例约为90%。其主要原料为油棕果, 相比椰子、油菜籽或葵花籽, 每公顷土地产出的油棕果产油量更高, 因此其生态可持续性也更好。

Aktioplast PP-veg尤其适用于天然橡胶胶料, 同时也适用于天然橡胶与合成橡胶的并用胶, 可以降低胶料的门尼粘度, 改善注射与挤出性能。该产品还能够改善胶料的焦烧性能, 促进硫化, 使橡胶制品易于脱模, 同时不污染模具。

(摘自《中国化工报》, 2020-03-09)