轮胎结构与模态特性的相关性研究

田　颖，朱振华，王建中，王剑波，张　敏
（中策橡胶集团有限公司，浙江 杭州　310018）

摘要：以225/45ZR17光面轮胎为例，根据设计经验，选取对轮胎模态特性可能产生影响的7个结构设计因素（胎面胶模量、胎面厚度、冠带形式、1#带束层宽度、带束层角度、胎侧胶模量和三角胶高度）设计正交试验，通过模态试验测试轮胎径向各阶频率和阻尼，研究轮胎结构对轮胎固有频率和阻尼的影响，判定各因素对模态频率和阻尼的影响显著程度和主次顺序及因素水平变化引起的模态特性的变化趋势。结果表明，胎面胶模量、胎面厚度和1#带束层宽度对轮胎前六阶模态频率和阻尼的影响较大。

关键词：轮胎；结构；模态特性；正交试验；方差分析
中图分类号：TQ336.1+1；TP311.1　　**文章编号**：1006-8171(2021)02-0071-05
文献标志码：A　　**DOI**：10.12135/j.issn.1006-8171.2021.02.0071

OSID开放科学标识码
（扫码与作者交流）

汽车的动力性、经济性、操纵稳定性与轮胎的动力学特性关系很大，因此研究轮胎在各种激励下的振动和噪声响应特性很有必要[1-3]，研究振动和噪声特性首先要研究轮胎的固有频率和模态特性[4]。朱新静等[5]分析了轮胎带束层结构改变对轮胎固有频率的影响规律。

本工作以225/45ZR17光面轮胎为例，根据设计经验，选取对轮胎模态特性可能产生影响的7个结构设计因素（胎面胶模量、胎面厚度、冠带形式、1#带束层宽度、带束层角度、胎侧胶模量和三角胶高度）设计正交试验，通过模态试验测试轮胎径向各阶频率和阻尼，研究轮胎结构对轮胎固有频率和阻尼的影响，判定各因素对模态频率和阻尼的影响显著程度和主次顺序及因素水平变化引起的模态特性的变化趋势，以期为后续整车配套过程中遇到的振动和舒适性问题提供解决思路。

1　轮胎固有频率和阻尼的试验方法

轮胎模态特性测试方法如图1所示。用弹簧绳将被测轮胎悬挂在刚性支架上，构造出自由-自由边界条件，将加速度传感器固定在胎冠中心表面，轮胎胎面均分为12个测点，使用移动力锤法进行模态测试，模态试验装置自带信号处理软件，可以直接得到各阶固有频率和阻尼。每个方案各试制5条轮胎（按试验顺序编为1#—5#）进行重复试验，选取数据相近的3条轮胎的试验数据。

（a）整体　　（b）局部放大

图1　轮胎模态特性测试

作者简介：田颖（1990—），女，浙江杭州人，中策橡胶集团有限公司工程师，硕士，主要从事轮胎振动和噪声相关分析工作。
E-mail：623669798@qq.com

2　正交试验方案制定

正交试验法是能够有效研究多因素多水平的设计方法，已运用于轮胎外轮廓参数的优化设计[6]。对于七因素二水平的试验，若不考虑交互作用，可利用正交表$L_8(2^7)$安排，如表1所示。

3　结果与讨论

3.1　试验误差分析

以方案2为例，选择2#，3#和5#轮胎的试验数据，以2#轮胎为基准，分析结果如表2所示。

从表2可以看出，模态频率和模态阻尼的相对偏差均较小，在3%以内。

表1 正交设计方案

方案编号	因素						
	胎面胶模量	胎面厚度	冠带形式	1#带束层宽度	带束层角度	胎侧胶模量	三角胶高度
1	1(*A*)	1(8/9)	1(1层半)	1(180)	1(30)	1(*C*)	1(35)
2	1(*A*)	1(8/9)	1(1层半)	2(200)	2(24)	2(*D*)	2(20)
3	1(*A*)	2(9.5/10.5)	2(2层)	1(180)	1(30)	2(*D*)	2(20)
4	1(*A*)	2(9.5/10.5)	2(2层)	2(200)	2(24)	1(*C*)	1(35)
5	2(*B*)	1(8/9)	2(2层)	1(180)	2(24)	1(*C*)	2(20)
6	2(*B*)	1(8/9)	2(2层)	2(200)	1(30)	2(*D*)	1(35)
7	2(*B*)	2(9.5/10.5)	1(1层半)	1(180)	2(24)	2(*D*)	1(35)
8	2(*B*)	2(9.5/10.5)	1(1层半)	2(200)	1(30)	1(*C*)	2(20)

注:*A*,*B*,*C*,*D*分别为4款胎面胶和胎侧胶的弹性模量,*A*>*B*,*C*>*D*;胎面(冠部/基部)厚度、1#带束层宽度和三角胶高度单位为mm,带束层角度单位为(°)。

表2 方案2试验误差分析

项 目	轮胎编号			相对偏差/%	
	2#	3#	5#	3#	5#
模态频率/Hz					
一阶	95.535	93.326	95.687	−2.31	+0.16
二阶	110.563	108.195	110.495	−2.14	−0.06
三阶	135.299	132.812	135.074	−1.84	−0.17
四阶	162.197	159.542	161.744	−1.64	−0.28
五阶	190.709	188.326	190.379	−1.25	−0.17
六阶	221.392	219.015	220.978	−1.07	−0.19
模态阻尼比/%					
一阶	5.78	5.90	5.72	+2.08	−1.04
二阶	4.07	4.12	4.18	+1.23	+2.70
三阶	3.38	3.43	3.45	+1.48	+2.07
四阶	3.21	3.16	3.26	−1.56	+1.56
五阶	3.03	3.02	3.07	−0.33	+1.32
六阶	3.11	3.10	3.18	−0.32	+2.25

3.2 极差分析

极差分析过程如图2所示。k_{jm}为j因素m水平的试验指标之和,由k_{jm}值可以判断j因素的优水平和各因素的水平组合,即最优组合;$\bar{k}_{jm}$为k_{jm}的平均值;R_j为j因素的极差,反映了j因素水平变动时试验指标的变化幅度,其值越大,说明对试验指标的影响越大,因此也就越重要。

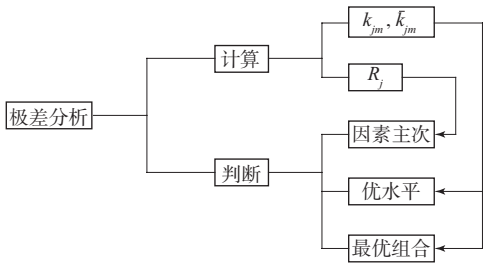

图2 极差分析过程示意

以一阶频率为例,分析各因素对一阶频率(方案1—8分别为98.992,95.535,87.311,99.055,87.810,94.323,87.436,89.962 Hz)的影响程度,计算各因素极差,进行主次判断。分析结果如表3所示。

根据极差绝对值大小进行判断,各因素对一阶频率和阻尼的影响由大到小排列如下。频率:胎面胶模量,三角胶高度,1#带束层宽度,胎面厚度,胎侧胶模量,带束层角度,冠带形式;阻尼:带束层角度,胎侧胶模量,冠带形式,胎面胶模量,胎面厚度和1#带束层宽度,三角胶高度。

其他各阶频率及阻尼分析方法相同,各因素对各阶频率和阻尼的影响由大到小排列如下。二阶频率:胎面胶模量,胎面厚度,冠带形式,1#带束层宽度,三角胶高度,胎侧胶模量,带束层角度;三阶频率:胎面胶模量,1#带束层宽度,胎面厚度,三角胶高度,冠带形式,胎侧胶模量,带束层角度;四阶频率:胎面胶模量,1#带束层宽度,胎面厚度,三角胶高度,冠带形式,胎侧胶模量,带束层角度;五阶频率:胎面胶模量,胎面厚度,1#带束层宽度,三

表3 各因素对一阶频率影响的极差分析 Hz

项 目	胎面胶模量	胎面厚度	冠带形式	1#带束层宽度	带束层角度	胎侧胶模量	三角胶高度
k_1	380.893	376.660	371.925	361.549	370.588	375.819	379.806
k_2	359.531	363.764	368.499	378.875	369.836	364.605	360.618
$\bar{k}_1$	95.223	94.165	92.981	90.387	92.647	93.955	94.952
$\bar{k}_2$	89.883	90.941	92.125	94.719	92.459	91.151	90.155
R	5.340	3.224	0.856	−4.332	0.188	2.804	4.797

角胶高度，冠带形式，胎侧胶模量，带束层角度；六阶频率：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，三角胶高度，胎侧胶模量，冠带形式，带束层角度；二阶阻尼：带束层角度，胎侧胶模量，冠带形式，胎面胶模量，胎面厚度和1#带束层宽度，三角胶高度；三阶阻尼：胎面胶模量，1#带束层宽度，胎侧胶模量，三角胶高度，胎面厚度，带束层角度，冠带形式；四阶阻尼：胎面胶模量，1#带束层宽度，带束层角度，胎侧胶模量，胎面厚度，三角胶高度和冠带形式；五阶阻尼：胎面胶模量，1#带束层宽度，胎面厚度，带束层角度，胎侧胶模量，冠带形式，三角胶高度；六阶阻尼：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，带束层角度，胎侧胶模量，冠带形式，三角胶高度。

3.3　显著性检验

极差分析方法简单明了，但无法区分因素各水平试验结果间的差异是由因素水平不同引起的还是由试验误差引起的。因此采用方差分析方法对试验结果进行分析，将因素水平变化引起的试验结果间的差异与误差波动所引起的差异区分开来。利用F检验法进行显著性（P值）检验，取95%置信区间，若P值＜0.05则认为该因素水平的变化对试验结果有显著的影响，若P值≥0.05则认为影响不显著。

利　用 SPSS（Statistical Product and Service Solutions）统计分析软件进行P值检验，以一阶模态频率结果为例，计算结果如表4所示。

表4　一阶模态频率方差分析结果

因　素	P值	因　素	P值
胎面胶模量	0.000	带束层角度	0.235
胎面厚度	0.000	胎侧胶模量	0.000
冠带形式	0.035	三角胶高度	0.000
1#带束层宽度	0.000		

从表4可以看出，胎面胶模量、胎面厚度、1#带束层宽度、胎侧胶模量、三角胶高度和冠带形式对一阶模态频率结果影响显著，而带束层角度对一阶模态频率结果影响不显著，说明带束层角度引起的一阶模态频率变化是试验误差占主导因素。

其他各阶频率及阻尼分析方法相同，结论汇总如表5和6所示。

3.4　综合分析

进行显著性检验后，对极差分析结果做出调整，各因素对各阶频率和阻尼的影响由大到小排列如下。一阶频率：胎面胶模量，三角胶高度，1#带束层宽度，胎面厚度，胎侧胶模量，冠带形式；二阶频率：胎面胶模量，胎面厚度，冠带形式，1#带束层宽度，三角胶高度，胎侧胶模量，带束层角度；三阶频率：胎面胶模量，1#带束层宽度，胎面厚度，三角胶高度，冠带形式，胎侧胶模量，带束层角度；四阶频率：胎面胶模量，1#束层宽度，胎面厚度，三角胶

表5　各阶模态频率试验结果的P值检验

因　素	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
胎面胶模量	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
胎面厚度	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
冠带形式	0.035（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
1#带束层宽度	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
带束层角度	0.235（不显著）	0.002（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.009（显著）	0.085（不显著）
胎侧胶模量	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
三角胶高度	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）

表6　各阶模态阻尼试验结果的P值检验

因　素	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
胎面胶模量	0.004（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
胎面厚度	0.674（不显著）	0.037（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
冠带形式	0.279（不显著）	0.629（不显著）	0.404（不显著）	0.001（显著）	0.031（显著）	0.075（不显著）
1#带束层宽度	0.127（不显著）	0.004（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
带束层角度	0.010（显著）	0.286（不显著）	0.008（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
胎侧胶模量	0.002（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）	0.000（显著）
三角胶高度	0.076（不显著）	0.010（显著）	0.001（显著）	0.004（显著）	0.142（不显著）	0.770（不显著）

高度，冠带形式，胎侧胶模量，带束层角度；五阶频率：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，三角胶高度，冠带形式，胎侧胶模量，带束层角度；六阶频率：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，三角胶高度，胎侧胶模量，冠带形式；一阶阻尼：胎面胶模量，胎侧胶模量，带束层角度；二阶阻尼：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，三角胶高度，胎侧胶模量；三阶阻尼：胎面胶模量，1#带束层宽度，胎面厚度，三角胶高度，胎侧胶模量，带束层角度；四阶阻尼：胎面胶模量，1#带束层宽度，带束层角度，胎侧胶模量，胎面厚度，三角胶高度和冠带形式；五阶阻尼：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，冠带形式，胎侧胶模量，带束层角度；六阶阻尼：胎面胶模量，胎面厚度，1#带束层宽度，带束层角度，胎侧胶模量。

3.5 各影响因素的变化趋势

通过极差分析和方差分析，得到了对模态频率和阻尼有显著影响的因素，并对其影响程度进行了排序，但最终要找到改变某个因素对各阶频率和阻尼的影响趋势，即因素变化使频率和阻尼变大还是变小。

比较各因素两种水平的均值可得到各因素变化对各阶模态频率及阻尼的影响趋势，结果如表7和8所示。

表7 各因素变化对各阶模态频率的影响趋势

因 素	因素变化方向	一阶频率	二阶频率	三阶频率	四阶频率	五阶频率	六阶频率
胎面胶模量	*A*→*B*	变小	变小	变小	变小	变小	变小
胎面厚度	8/9→9.5/10.5	变小	变小	变小	变小	变小	变小
冠带形式	1层半→2层	变小	变小	变小	变小	变小	变小
1#带束层宽度	180→200	变大	变大	变大	变大	变大	变大
带束层角度	30→24	不显著	变小	变小	变小	变小	不显著
胎侧胶模量	*C*→*D*	变小	变小	变小	变小	变小	变小
三角胶高度	35→20	变小	变小	变小	变小	变小	变小

注：同表1。

表8 各因素变化对各阶模态阻尼的影响趋势

因 素	因素变化方向	一阶阻尼	二阶阻尼	三阶阻尼	四阶阻尼	五阶阻尼	六阶阻尼
胎面胶模量	*A*→*B*	变小	变小	变小	变小	变小	变小
胎面厚度	8/9→9.5/10.5	不显著	变大	变大	变大	变大	变大
冠带形式	1层半→2层	不显著	不显著	不显著	变小	变小	不显著
1#带束层宽度	180→200	不显著	变大	变大	变大	变大	变大
带束层角度	30→24	变小	不显著	变小	变小	变小	变小
胎侧胶模量	*C*→*D*	变小	变小	变小	变小	变小	变小
三角胶高度	35→20	不显著	变小	变小	变小	不显著	不显著

注：同表1。

4 结论

通过轮胎模态分析试验系统及设计可能影响轮胎模态特性的七因素二水平正交试验，研究轮胎结构对轮胎固有频率和阻尼的影响，并采用方差分析排除了试验误差的影响。结果表明，胎面胶模量、胎面厚度和1#带束层宽度对前六阶模态频率和阻尼的影响较大，并得到了各因素水平变化对模态频率和阻尼的影响趋势。

本研究尚存在许多不足之处，由于鲜有报道轮胎具体结构改变对模态频率和阻尼影响的显著性，因此分析的因素较多，且由于重复试验，试验量较大，所以每种因素只选取了2个水平进行分析，所得结论只针对各因素从水平1变化到水平2对模态频率和阻尼的影响显著程度，局限性较大，需要进一步完善和发展。

参考文献：

[1] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京：北京理工大学出版社，1996：212-241.

[2] 王琦，翟辉辉，周海超，等. 带束层结构参数对轮胎振动噪声的影响分析[J]. 橡胶工业，2018，65(5)：490-494.

[3] 安登峰，赵璠，王国林. 结构设计参数对轮胎振动噪声的影响[J].

橡胶工业,2016,63(10):609-614.
[4] 管迪华,彭会,范成建. 轮胎模态试验分析的研究[J]. 汽车工程,2005,27(6):691-695.
[5] 朱新静,朱作勇,赵鹏翔,等. 轮胎带束层结构变化对固有频率的影响研究[J]. 轮胎工业,2017,37(5):259-263.
[6] Kim Seong-rae, Sung Ki-deug, Lee Dong-woo, at el. Cavity Noise Sensitivity Analysis of Tire Contour Design Factors and Application of Contour Optimization Methodology[J]. Journal of Central South University of Technology,2012,19(8):2386-2393.

收稿日期:2020-09-30

Study on Correlation between Structure and Modal Characteristics of Tire

TIAN Ying, *ZHU Zhenhua*, *WANG Jianzhong*, *WANG Jianbo*, *ZHANG Min*
(Zhongce Rubber Group Co. ,Ltd,Hangzhou　310018,China)

Abstract: Taking 225/45ZR17 smooth tire as an example, an orthogonal test was designed to study the effect of tire structure on the natural frequency and damping of tire. Based on design experience, seven structural design factors were selected: tread compound modulus, tread thickness, crown ply form, 1# belt width, belt angle, sidewall compound modulus and apex height. The modal characteristics of tire such as radial frequencies and damping were obtained through the modal test. The significance of the influence of each factor on the modal frequency and damping and the change trend of the modal characteristics caused by the change of the factors were determined. The results showed that the tread compound modulus, tread thickness and 1# belt width had significant influence on the frequency and damping of the first six modes of the tire.

Key words: tire; structure; modal characteristic; orthogonal test; variance analysis

2020(第十三届)中国年度车轮揭晓

日前,汽车族传媒对全球发布了消费者期待许久的"2020(第十三届)中国年度车轮评选"的最终结果。此次评选是中国专业汽车传媒对乘用车轮胎产品全面、系统的年度盘点。专业评审团历经近3个月的专业测评,最终11款轮胎在严苛测试和重重考验中脱颖而出,分别摘得2020中国年度车轮11个不同奖项的桂冠(见表1)。

表1　2020(第十三届)中国年度车轮获奖名单

奖　项	轮胎牌号
2020中国年度舒适轮胎	佳通 SynergyE1
2020中国年度操控轮胎	德国马牌 ComfortContact CC6
2020中国年度安全轮胎	双星 金刚狼KUMKANG KH06
2020中国年度安全轮胎	玛吉斯 M36+
2020中国年度运动轮胎	朝阳 ZRT RP76
2020中国年度节油环保轮胎	玲珑 CM121
2020中国年度安全SUV轮胎	固特异 鹰驰F1 Asymmetric 3 SUV
2020中国年度均衡轮胎	统帅 MARSHAL MU12
2020中国年度舒适SUV轮胎	普利司通 ALENZA 遨然者001
2020中国年度SUV车轮	锦湖 翼驰达ECSTA PS71
2020中国年度车轮	普利司通 TURANZA 泰然者T005

本届入围参评的轮胎必须是2019年7月—2020年7月期间上市且未曾参加过年度车轮评选的轮胎;同时,参评轮胎必须是全新花纹或旧花纹增加的新规格;另外,轮胎不存在安全隐患、不在召回之列,同时满足各项法规,准许上市销售。

本届中国年度车轮评选的测试车队由上海汽车通用有限公司别克威朗和凯迪拉克CT5、全新奥迪Q3三款车型组成。根据评选规则,为确保评选的公正客观,测试团队赴江苏宜兴普利司通轮胎测试场进行为期10余天的场地测试,并在苏州、上海、北京等地展开日常道路主观评价测试。在场地测试环节,每款参评轮胎都按标准完成了包括安全性、动力性、操控稳定性、舒适性、噪声、滚动阻力等专业指标的测试,测试结果作为评审的重要依据和参考。在道路主观评价测试环节,参评的轿车轮胎和SUV轮胎都进行了包括城市、高速公路、乡村道路等多种工况的测试。

(摘自《中国汽车报》,2020-12-21)