



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170141

## 基于正交试验的汽车白车身优化

刘伟<sup>1,2</sup>, 王平<sup>2</sup>, 夏洪兵<sup>1</sup>, 李琦<sup>1,2</sup>, 穆瑞林<sup>2</sup>

(1. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300; 2. 天津科技大学机械工程学院, 天津 300457)

**摘要:** 为了优化白车身低频频率特性,采用有限元软件对白车身进行模态分析,得到模态频率及振型,有限元结果显示白车身低频频率特性不足,需对其进行优化.优化过程中,采用试验设计软件进行全因子试验,以模态频率为约束条件,以白车身重量最低为目标,量化结构板件尺寸并进行试验验证.结果表明:在车身优化中采用全因子试验技术,可以综合考察板件性能,同时简化优化流程,最终白车身在满足低频模态要求的前提下减重 7.8 kg.

**关键词:** 白车身; 低频频率特性; 有限元; 正交试验

**中图分类号:** U463.82      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-6510(2018)03-0069-04

## Optimization of BIP Based on Orthogonal Test

LIU Wei<sup>1,2</sup>, WANG Ping<sup>2</sup>, XIA Hongbing<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1,2</sup>, MU Ruilin<sup>2</sup>

(1. China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** Modal analysis of BIP was carried out by using finite element analysis software, and modal frequencies and shapes were obtained. According to the analysis result, the low frequency characteristics of BIP were not good and should be optimized. In the optimization process, full factorial experiments were carried out by using test design software. On the premise of low frequency characteristics, the BIP's mass was reduced, the plate size was determined, and the experimental verification was carried out. The final results show that the full factor test in the white body optimization process is useful in testing the performance of the plate, while simplifying the optimization process. Finally, the BIP's mass was reduced by 7.8 kg, while meeting the low frequency characteristics.

**Key words:** body in white (BIP); low frequency characteristic; finite element method (FEM); orthogonal experiment

噪声性能是驾驶员与乘客主观感受最明显的特性之一,噪声性能指标已逐渐成为衡量车辆性能优劣的重要指标之一<sup>[1]</sup>.车内噪声从频率的角度可以分为低频、中频和低频噪声.其中,低频噪声由结构振动传递引起,可以通过优化车身结构降低进行改善.同时,节能减排和提高材料利用率也是汽车工业追求的目标之一,因此应该在保证汽车性能的前提下,尽可能地降低汽车总质量.

2012年,唐晓峰等<sup>[2]</sup>根据车辆优化设计过程对试验设计的要求,深入研究推导了构造复杂正交试验设计矩阵的数学算法,并且据此开发了复杂正交试验设

计软件.2015年,胡小舟等<sup>[3]</sup>针对白车身有限元模型,采用模态应变能方法进行第一轮板件筛选,随后进行板件灵敏度分析,针对低频一阶模态进行结构与厚度的优化,最终实现白车身低频模态性能提升的同时不增加车身质量.2016年,钱平等<sup>[4]</sup>基于白车身有限元模型进行了白车身自由模态分析,根据一阶弯扭模态结果进行板件厚度灵敏度分析,对白车身进行结构优化,同时根据板件厚度灵敏度分析结果进行了板件厚度轻量化分析,最终减重 26.4 kg.2017年,罗森等<sup>[5]</sup>针对汽车整备车身采用有限元和能量统计的方法,从低频和低频角度进行车身板件材料优化,低频

收稿日期: 2017-05-22; 修回日期: 2018-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508386)

作者简介: 刘伟(1989—),男,辽宁人,硕士研究生;通信作者: 王平,教授,wp2004@tust.edu.cn

特性主要考察了局部动刚度和声学灵敏度,最终在减重的同时保证整车声学性能不降低. 2017年,左文杰等<sup>[6]</sup>以刚度、强度、模态为约束,进行了基于白车身有限元模型的白车身板厚尺寸优化,优化中选取了82个组件,以厚度为变量,采用序列线性规划的方法进行非线性优化,最终白车身减重34.6 kg,白车身整体质量下降11.4%. 2017年,许少楠等<sup>[7]</sup>以某商用车白车身为研究对象,采用有限元技术进行低频模态分析与优化,最终提出更改顶盖弧度的方案,以提高驾驶室一阶模态频率. 综上,可以采用应变能法、板厚灵敏度法、能量统计法等进行有的放矢的白车身优化工作,但是,优化中通常依靠经验对目标板件厚度进行设定,未能科学系统地进行最优板件选取. 同时,在板件厚度优化中,依靠人力进行前处理、后处理等工作,耗时过多,将CAE工程师束缚在这种重复性较高的工作中.

本文以某型SUV白车身为研究对象,进行基于有限元法的白车身模态分析与优化,采用正交试验法对白车身分板件厚度进行量化,提出新的板件厚度量化流程,在前处理与后处理中大大缩减了操作流程和耗时.

### 1 某白车身模态分析

将正交试验技术应用于某型SUV白车身板件厚度优化,流程见图1.  $a$ 为分析板件的厚度个数; $n$ 为分析板件的个数.

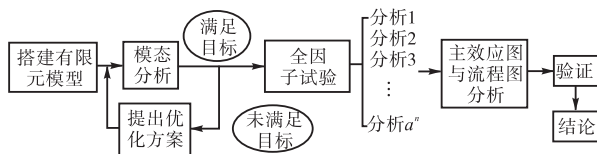


图1 板件厚度定量分析流程图

Fig. 1 Flow chart of quantitative analysis of plate thickness

对白车身几何模型进行离散处理,车身钣金件采用10 mm × 10 mm壳体网格进行划分,焊点采用六面体单元模拟焊核, rbe3单元连接焊核与焊接板件,焊核尺寸为6 mm,胶粘采用实体单元与弹性单元模拟,白车身总质量373.3 kg,单元总数774 293个,节点总数794 114个,建立的有限元模型见图2.

采用Lanczos方法进行白车身有限元模型自由模态求解. 通常白车身低频频率特性只关注一阶弯曲模态、一阶前端横摆模态、一阶后端开口扭转模态

(简称一阶后扭模态).

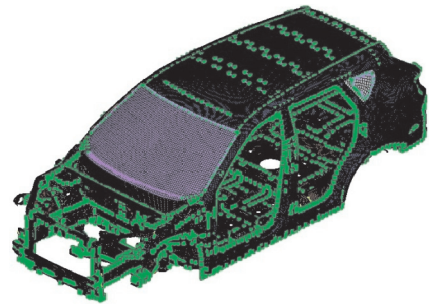


图2 白车身有限元模型

Fig. 2 BIP finite element model

自由白车身弹性模态分析结果显示(表1),一阶前端横摆模态、一阶弯曲模态、一阶后扭模态均未达标. 下一步采用灵敏度优化理论,以板件厚度为变量,分别针对一阶弯曲模态和一阶后扭模态进行板厚灵敏度分析,根据灵敏度分析结果进行结构与板件厚度优化,对一阶前端横摆模态进行基于模态应变能法的局部结构优化,最终自由白车身弹性模态优化结果见表1.

表1 自由白车身弹性模态分析与优化结果

Tab. 1 Results of elastic modes optimization and analysis of free BIP

模态类型	模态频率/Hz		
	分析结果	优化结果	目标
一阶弯曲	45.6	50.9	46
一阶前端横摆	37.5	43.0	42
一阶后扭	33.2	37.4	38

### 2 基于正交试验的板件定量分析

#### 2.1 选择设计变量

白车身模型共由396块不同厚度的高强度钢板焊接而成,在进行正交试验时,若使试验矩阵覆盖全部板件,从计算资源考虑是不可能完成的,同时也没有实际意义. 白车身模型主要有纵梁、横梁等梁结构,以及顶棚、地板、侧围板、防火板、玻璃、轮罩等大块板件构成. 其中,大块板件往往是起到表面蒙皮、包裹内部结构的作用,对性能的灵敏度通常较低. 对白车身整体模态影响较大的主要是梁的刚度与板件接口的连接刚度,因此在选取板件厚度优化因子中,重点关注大块板件的厚度. 在选取优化因子的水平时,为节约计算资源,根据高强钢板常用厚度以及对比其他车型板件厚度确定. 结合板件灵敏度分析结果,选择顶棚、防火板、后三角窗框、后轮罩、中

通道盖板、地板等 11 块板件,通常左右对称件厚度相同,故将左右对称的板件设为为一组,11 块板件最终分为 6 组,将每组板件的厚度设为变量,选择 2 个水平,具体见表 2 和图 3.

表 2 正交试验因子与水平

Tab. 2 Factor and level of orthogonal test

符号	变量及单位	水平 1	水平 2
A	顶棚厚度/mm	0.6	0.8
B	防火板厚度/mm	0.6	0.8
C	后三角窗框厚度/mm	0.6	0.8
D	后轮罩厚度/mm	0.7	1.0
E	中通道盖板厚度/mm	1.0	1.4
F	地板厚度/mm	0.6	0.8

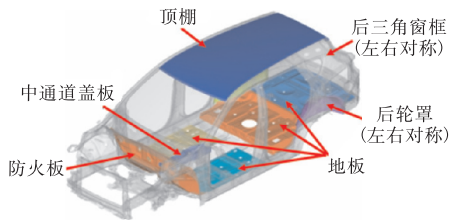


图 3 正交试验选择因子示意图

Fig. 3 Factor selection of orthogonal test

### 2.2 正交试验表

为充分考察交互作用,进行  $L_{64}(2^6)$  的全因子试验分析,全因子正交试验表见表 3.

表 3 全因子正交试验表

Tab. 3 Full factorial orthogonal test table

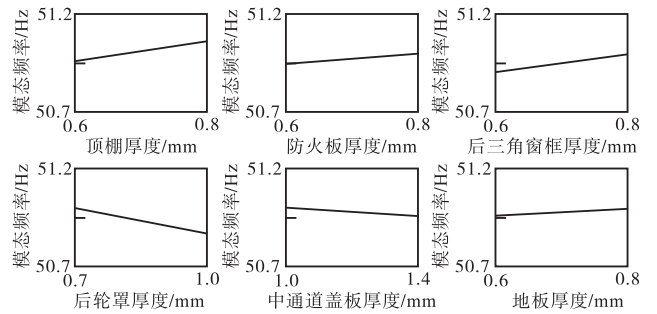
实验号	因子的水平					
	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
63	2	2	2	2	2	1
64	2	2	2	2	2	2

### 2.3 正交试验结果分析

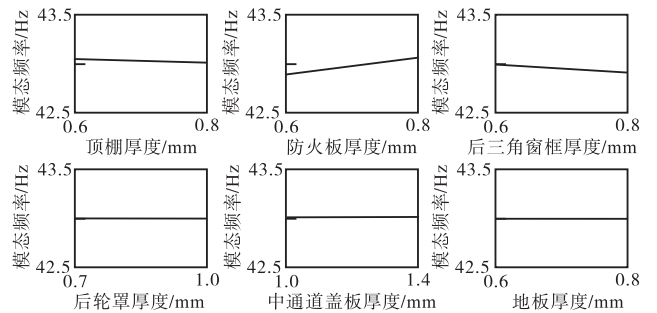
在白车身有限元模型中设置试验因子,采用试验设计软件生成全因子正交试验表,调用求解器进行试验分析,最终得到主效应图与流程图.通过主效应图可以直观地得到每组因子对白车身一阶弯曲模态、一阶前端横摆模态、一阶后扭模态的影响,根据流程图可以得到不同水平下的白车身关注模态值,具体见图 4、图 5.

正交试验过程结果显示:顶棚 0.6 mm、防火板 0.6 mm、后三角窗框 0.6 mm、后轮罩 0.8 mm、中通道盖板 0.7 mm、地板 0.6 mm 时,白车身一阶弯曲模态、一阶前端横摆模态、一阶后扭模态仍满足目标要

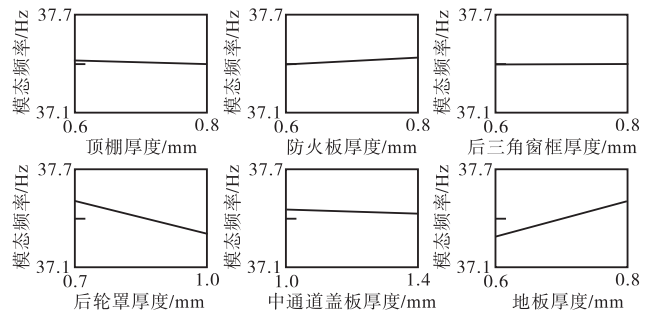
求.根据正交试验结果更新白车身有限元模型,正交试验分析结果误差在 10% 以内,具体见表 4.



(a) 变量对一阶弯曲模态的主效应图



(b) 变量对一阶前端横摆模态的主效应图



(c) 变量对一阶后扭模态的主效应图

图 4 主效应图

Fig. 4 Main effect diagram

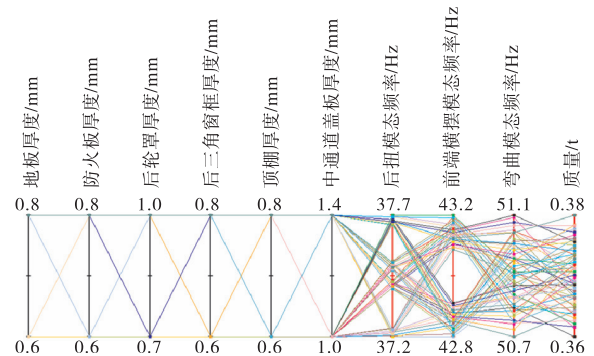


图 5 正交试验流程

Fig. 5 Diagram of orthogonal test process

表4 正交试验结果对比

Tab. 4 Comparison of orthogonal test results

模态类型	模态频率/Hz		相对误差/%
	正交试验	更新验证	
一阶弯曲	50.726 4	50.8	0.2
一阶前端横摆	42.849 0	42.9	0.1
一阶后扭	37.164 3	39.4	6.0

2.4 正交试验结果验证

对白车身进行模仿自由边界条件的模态试验,白车身采用空气弹簧支撑,采用两个激振器分别置于车身右前纵梁与左后纵梁位置,采用两个激振器产生猝发随机信号对白车身进行激励,见图6.



图6 白车身自由边界条件模态试验示意图

Fig. 6 The modal experiment diagram of white body under free boundary condition

在白车身模态试验前确定白车身测试状态:有前副车架、安装玻璃、地板无阻尼;环境温度 22℃;相对湿度 20%.

试验用到的设备有 PCB 三向加速度传感器、208C02 型力传感器、TV52110 型电动激振器、TV52110 型激振器功率放大器、SC316 型 48 通道数据采集 2 通道激励系统,数据采用模态试验分析软件 LMS Test.lab.11B 进行分析.传感器分布见图7.验证试验与有限元分析结果对比见表5.

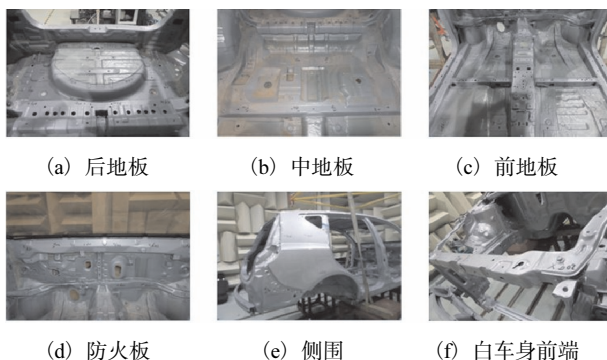


图7 白车身试验传感器分布示意图

Fig. 7 Sketch map of sensors in white body test

白车身分析结果与模态试验结果对比表明:误差控制在 6% 的范围内,证明有限模型分析结果较准确,优化方案实施效果较好.

表5 试验结果与有限元分析结果对比

Tab. 5 Comparison of experimental results with the finite element results

模态类型	模态频率/Hz		相对误差/%
	模态试验	有限元分析	
一阶弯曲	53.7	50.8	5.4
一阶前端横摆	45.1	42.9	4.9
一阶后扭	35.3	37.4	2.1

3 结 语

本文将全因子试验技术用于白车身板件厚度优化,采用新的定量分析流程,前处理时将板件厚度设为变量,分析工程师针对工程问题提出可行方案,采用全因子试验确定具体结构厚度,从而节省工程优化耗时,提高了工作效率,在满足低频特性的前提下,成功减重 7.8 kg. 最后,进行白车身模态分析试验,CAE 分析结果与试验结果对比表明,CAE 分析结果可信度较高,满足工程实际需要.

参考文献:

[1] 傅旻,李琦,霍俊炎,等. 等效辐射声功率在汽车 NVH 开发中的应用[J]. 天津科技大学学报,2017, 32(5): 60-63,78.

[2] 唐晓峰,姜欣,陈勇,等. 车辆优化设计中的复杂正交试验设计[J]. 上海汽车,2013(11):44-48,59.

[3] 胡小舟,林建平,陈龔,等. 基于模态应变能及灵敏度分析白车身模态优化[J]. 机械科学与技术,2015, 34(9):1415-1418.

[4] 钱平,包键,李建新. 白车身模态灵敏度分析及减重优化[J]. 汽车科技,2016(1):26-28.

[5] 罗森,尚善春. 车身轻量化与噪声性能的平衡与优化[J]. 农业装备与车辆工程,2017,55(1):31-34.

[6] 左文杰,陈继顺,李亦文,等. 刚度、强度与频率约束下的白车身板厚尺寸优化[J]. 汽车工程,2017,39(2): 145-149.

[7] 许少楠,王香廷,顾歆,等. 某商用车白车身模态分析及结构优化[J]. 汽车实用技术,2017(2):178-181.

责任编辑:常涛