车用多阶刚度钢板弹簧的有限元分析法

周 思1,莫铭杰1,郭 震2,黄传海1,何金泉1

(1.柳州坤菱科技有限公司,广西柳州 545007; 2.柳州五菱新能源汽车有限公司,广西柳州 545007)

摘 要:搭建自由状态下多阶刚度板簧的有限元模型,模拟板簧台架试验的装配和加载过程,开展对 应的台架试验。比较计算结果和台架试验结果,验证有限元计算的准确性,为同行提供参考。

关键词:多阶刚度;钢板弹簧;有限元分析;台架试验

中图分类号:U463.33⁺4 文献标志码:A 文章编号:1006-3331(2024)04-0044-05

Finite Element Analysis Method of Multi-order Stiffness Leaf Springs for Vehicles

ZHOU Si1, MO Mingjie1, GUO Zhen2, HUANG Chuanhai1, HE Jinquan1

(1. Liuzhou Kunling Technology Co., Ltd., Liuzhou 545007, China;

2. Liuzhou Wuling New Energy Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545007, China)

Abstract: This paper builds the finite element model of a plate spring with the multi-order stiffness in the free state, simulates the assembling and loading process of the plate spring bench test, and carries out the corresponding bench test. It compares the calculated results with the bench test results to verify the accuracy of finite element calculation and provide references for peers.

簧的作用。

Key words: multi-order stiffness; leaf spring; finite element analysis; bench test

钢板弹簧是汽车悬挂装置中常用的一种弹性元件。在钢板弹簧设计中,由于其自身的接触非线性,板簧强度计算时一般都忽略了其从自由状态到夹紧状态的预压应力^[1-4]。本文以某新能源车多片等截面、多阶刚度钢板弹簧为例,创建钢板弹簧的三维实体几何模型,对其进行从自由状态到夹紧状态再到上极限状态的有限元计算,并与台架试验结果对比,以验证本文所用方法的正确性。

1 建立钢板弹簧的三维几何模型

某轻型汽车的后悬钢板弹簧设计刚度为一阶刚 度 80 N/mm,二阶合成刚度 150 N/mm,三阶合成刚 度 280 N/mm,分别为板簧总成在空载、半载及满载时 对应的刚度。钢板弹簧自由状态下的设计尺寸见表 1。钢板弹簧自由状态的三维几何模型如图 1 所示: 一共有 7 片,其中主簧 3 片,上、下副簧各 2 片,另外 上副簧与主簧之间还有 1 个隔垫片,主要起到垫高副

表1 各簧片的尺寸参数 mm 板簧片号 伸直长 前半段长度 厚度 宽度 弧高 1 730 365 7 70 36 2 690 345 6 70 38 3 1 200 700 10 70 103 4 1 100 550 70 8 87 5 920 460 8 70 71 6 730 365 13 70 1 7 690 345 13 70 1.5



收稿日期:2024-01-02。

第一作者:周 思(1986—),女,工程师;主要从事汽车底盘结构仿真分析工作。E-mail:14751922@qq.com。

2 建立钢板弹簧的有限元模型

2.1 网格划分

本文采用 8 节点非协调单元 C3D8I 对板簧和 U 型螺栓进行网格划分;并截取桥壳和板簧连接部分, 抽取其中面,采用 2D 单元 S4R 进行网格划分;板簧 上下夹板、车架上前后缓冲胶限位支架采用四面体网 格划分,单位类型为 C3D4^[5-7]。自由状态下划分好 的板簧总成网格模型节点数量为 111 207 个,网格数 量为 319 167 个,其有限元网格模型如图 2 所示。



图 2 板簧总成自由状态下的有限元网格模型

2.2 材料属性定义

完成钢板弹簧总成网格划分后,需对其进行材料 属性定义。本文钢板弹簧总成所用材料的属性见表 2。由于限位块中橡胶材料性质较为复杂,且在本文 中对板簧性能的影响较小,故将限位块的材料属性简 化为其支座材料的属性。

零件 名称	材料 名称	密度/ (g·cm ⁻³)	抗拉极 限/MPa	屈服极 限/MPa	弹性模 量/GPa
板簧	60Si2MnA	7.85	1 570	1 375	206
螺栓	40Cr	7.8	980	785	206
桥壳	B510L	7.8	510	355	206
上夹板	SAPH440	7.8	440	305	206
下夹板	20#	7.8	410	300	206
限位块	SAPH440	7.8	440	305	206

表 2 钢板弹簧材料力学性能

2.3 钢板弹簧的装配关系定义

实际受力过程中,钢板弹簧是处于夹紧状态,而 每片板簧的弧高不同,因此钢板弹簧在夹紧状态下有 预压应力。板簧的连接关系也因此变得复杂。

2.3.1 板簧中心螺栓的模拟

板簧在装配时,先用一颗螺栓将自由状态板簧夹 紧(在中心位置)。本文使用单元模拟器移动副来模 拟板簧中心螺栓,只有一个沿着板簧夹紧方向的自由 度,如图3所示。





2.3.2 接触的定义

接触关系包括面与面的接触、面与边的接触、边 和边的接触以及点焊接触,接触可传递结构载荷^[8]。 板簧模型的初始状态为自由状态,需要预压到装配状 态,因此,簧片之间、簧片与后桥之间、簧片与夹板之 间、U型夹与夹板之间均要设置接触,摩擦系数均设 置为0.1。

2.4 模型边界条件定义

钢板弹簧有限元分析,板簧卷耳处自由度、板簧 中心夹装等参照台架试验工况。

有限元模型在软件中依次完成从自由状态到夹 紧状态、装配状态、上极限状态的加载。夹紧状态即 板簧中心螺栓将各片钢板夹紧到消除间隙状态;装配 状态即对应整车空载状态;上极限状态即车轮跳到上 极限对应的状态,本文的上极限为轮跳 95 mm。各状 态在本文中均用主簧第一片的弧高变形量来表征。

由于需要和台架试验比对,因此主要考核板簧上 极限状态时的应力结果。上极限对应的主簧最上片 的弧高变形量为132 mm(对应轮跳95 mm)。根据整 车坐标系(1、2、3 分别代表 x、y、z 向平动自由度,4、5、 6 分别 x、y、z 向转动自由度),本文钢板弹簧有限元模 型从自由状态到装配状态的边界条件为前、后卷耳约 束 2346,后桥中心约束 123456,限位块约束 123456, 模拟加载状态时其他约束保持,释放后桥中心约束。 约束处理后的板簧有限元模型如图 4 所示。



图 4 约束处理后的板簧有限元模型

2.5 载荷工况

在板簧模型的每个骑马螺栓上加载 15 000 N 的 力模拟装配预紧力。保持该螺栓预紧力,后桥中心加 载板簧上极限状态时对应的弧高变形量,即轮跳在 95 mm 时对应的主簧最上片(即第三片板簧)中心的 弧高变形量为 132 mm。

3 有限元计算结果

3.1 极限轮跳钢板弹簧强度

3.1.1 钢板弹簧各片应力

将加载后的有限元模型提交求解模块进行求解, 得到各片的最大应力值,如图 5 所示。







上述结果中包含了预压应力。由于本文主要是 和台架试验结果对比,受篇幅限制,故不再另外单独 阐述预压应力的大小。

3.1.2 强度评估

参考板簧的开发经验,板簧强度的安全系数取 1.2倍,本文板簧材料牌号为 60Si2MnA,屈服极限为 1 375 MPa。因此,板簧的许用应力为 1 146 MPa^[9]。 钢板各片弹簧强度详见表 3。

|--|

板簧片号	最大应力	许用应力
1	834	1 146
2	945	1 146
3	762	1 146
4	874	1 146
5	1131	1 146
6	554	1 146
7	752	1 146

3.2 钢板弹簧刚度分析结果

提取桥壳中心输出的反力和位移,即可求出钢板 弹簧的刚度值。图 6 为钢板弹簧的力-位移曲线图。 图中各阶刚度分界点的位移分别为 50 mm、97 mm、 132 mm,对应的力分别为 4 250 N、11 400 N、21 730 N。



通过公式 $K = \Delta F / \Delta S (\Delta F)$ 为板簧每阶刚度测定 范围的力值增量, ΔS 为每阶刚度测定范围的位移增 量)计算钢板弹簧的各阶刚度值(表 4), 与设计值的 结果接近,误差在 5.9%以内。

板簧刚度	计算值/ (N•mm ⁻¹)	设计值/ (N·mm ⁻¹)	误差/%
主簧(一阶)刚度	85	80	5.9
二阶(合成)刚度	152	150	1.3
三阶(合成)刚度	288	280	2.8

表 4 钢板弹簧刚度计算值和设计值

4 与台架试验对比

4.1 试验准备

参照 GB/T 19844—2018^[10]对钢板弹簧进行台架 装夹。装夹前对板簧应力集中区域贴应变片以测试 试验应力。贴片位置分布如图 7 所示,贴好应变片的 板簧工装如图 8 所示。



图 7 贴应变片位置



图 8 贴好应变片的板簧工装

为保证结果的一致性,板簧台架试验的加载位移

与计算时的保持一致,设置好最大位移量后,等板簧 缓慢加载至极限位置时停下,导出测试数据并进行后 处理。

4.2 应力对比

试验测出板簧各测点的应力见表 5(由于测试设 备通道不够,第4第5片簧没有实测)。各测点应力 与计算应力的对比见表 6。为确保结果的严谨性,应 对比同一位置的应力,表6中列出的测试应力和计算 最大应力在同一位置(具体如图5所示)。

表 5 钢极弹黄谷测点应力	

板簧片号	测点	应力
1	9	828
1	10	830
2	7	959
2	(8)	961
2	(5)	781
5	6	773
6	3	547
0	4	560
7	1	730
/	2	742

表 6 钢板弹簧各测试应力与计算结果对比

板簧片号	测试应力/MPa	计算应力/MPa	误差/%	
1	828	834	0.7	
2	959	945	1.5	
3	773	762	1	
6	547	554	1.3	
7	742	752	1.3	

4.3 刚度对比

试验方法为:在钢板弹簧的中间位置缓慢、连续 地进行加载和卸载,然后再连续缓慢地进行加载,并 记录加载和卸载过程中钢板弹簧的变形量^[11]。本文 载荷分别为 3 150 N、10 000 N、10 550 N、11 000 N、 14 000 N、21 730 N。

测试记录如图 9 和图 10 所示。其中,各阶刚度 同样通过 $K = \Delta F / \Delta S$ 计算。

MPa

测试结果 1						
测试项目		标准值		测试值		
主簧(一阶)刚度(N/mm)		80. 0+6. 0			83.7	
二阶合成刚度(N/mm)		160. 0±13. 0			168.6	
主簧(一阶)静载荷弧高(mm)		87. ()+6.0		92. 56	
二阶合成静载荷弧高(mm)		39-	+6.0		38.86	
主簧一阶弹性变形(mm)		39			37.64	
二阶合成弹性变形(mm)		87			91. 34	
自由弧高(mm)		126.0+6.0			130. 2	
永久变形(mm)		+0.5			0.06	
测试关键点及测试结果	测试关键点及测试结果 加载变		形(mm) 卸戟变形(m		平均值(mm)	
$P_1[N] = 3\ 150$	3	5. 72	39. 57	7	37.64	
P ₂ [N] = 700		9.4 11.7		7	10. 59	
$P_3[N] = 10\ 000$	8	35. 33 90. 69)	88.01	
$P_4[N] = 10550$	8	8. 79 93. 88		3	91.34	
P ₅ [N]-11 000	9	1.64	96. 24	1	93.94	

图 9 主簧(一阶)刚度测试及计算记录

测试结果 2						
测试项目		标准值		测试值		
二阶合成刚度(N/mm)		160. 0±13. 0		157.9		
三阶合成刚度(N/mm)		280. 0±22. 0		271.2		
二阶合成静载荷弧高(mm)		39+	+6.0	38. 99		
三阶合成静载荷弧高(mm)		39±	±6.0		-4.19	
二阶合成弹性变形(mm)		8	37		90. 62	
三阶合成弹性变形(mm)		123			133.79	
自由弧高(mm)		126. 0±6. 0		129.6		
永久变形(mm)		±0.5		0.06		
测试关键点及测试结果	加载变	眨形(mm)	卸载变形(mm)	平均值(mm)	
$P_1[N] = 10\ 000$	8	3. 39	90. 8	l	87.1	
Pj ₁ [N] = 10 550	8	6. 89 94. 34		1	90.61	
P ₂ [N]-11 000	8	9. 69 97.		3	93.44	
P ₃ [N] = 14 000	1	06. 1 111. 4		1	108. 75	
Pj ₃ [N] = 21 730	13	1.83	135.74		133. 79	
$P_4[N] = 18\ 000$	11	9.65	124. 54		122. 10	

图 10 板簧合成刚度测试记录

图 9 及图 10 对应的加载和卸载曲线如图 11 和 图 12 所示。





图 12 板簧总成刚度测试的加载及卸载曲线

对钢板弹簧刚度仿真分析结果和测试结果进行 对比分析,详见表 7。

表 7	钢板弹簧测试刚度与仿真结果对比
-----	-----------------

刚度阶次	测试刚度/ (N·mm ⁻¹)	仿真刚度/ (N・mm ⁻¹)	误差/%
主簧刚度	83. 3	85	1.6
二阶(合成)	157.9	152	3.7
三阶(合成)	271.2	288	6.2

4.4 小 结

由 4.2 节可知,钢板弹簧强度计算结果和测试结 果非常接近,最大误差在 1.5%以内;由 4.3 节可知, 钢板弹簧刚度计算结果和测试结果误差范围在 6.2% 以内。计算精度满足工程需求。

5 结束语

本文对某三阶刚度钢板弹簧的结构设计和有限 元分析进行介绍,通过台架测试充分验证有限元计算 的准确性和可靠性,形成了一套多阶刚度钢板弹簧的 分析流程和规范,从而快速响应市场以节约时间和经 济成本,为企业开发新车型板簧悬挂提供参考。

(下转第57页)

夜间模式时上述第1)~3)条中的(a)种情况关 闭大灯后,由P挡挂入其他任意挡位时,恢复AUTO 模式自动点亮大灯,重新进入AUTO(自动点亮/关 闭)模式。

5 结束语

安装自动大灯的车辆可提高行车安全,减少交通 事故的发生。通过本文分析可知,自动大灯通过 BCM 进行集中控制,通过组合仪表显示判断自动大 灯是否开启,使用传统的组合灯开关进行改进就可实 现前大灯的全天 AUTO 模式,并在 AUTO 模式下实现 远光灯开启功能。此控制策略简易可行,操作性和实 用性强,无需全新开发组合灯开关,节约成本;完全符 合 ECE R48 08 版自动大灯要求,并已在出口欧盟的 某 N 类汽车上验证。

参考文献:

- [1] 朱海楠, 贾晓龙, 占传送. 自动大灯系统方案设计浅谈[J]. 汽车与驾驶维修(维修版), 2017(11):123.
- [2] 吴成加. 基于 LIN 总线的雨量灯光控制系统设计及应用[J]. 客车技术与研究,2020,42(2):45-47.

- [3] 舒望. 汽车自动大灯控制模块的设计[J]. 机械工程师, 2020(11):8-9.
- [4] UNECE. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices: UN Regulation No. 48- Rev. 12-Amend. 8
 [S]. Geneva: Economic Commission for Europe of the United Nations, 2021:3.
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车及挂车外部照明和 光信号装置的安装规定:GB 4785—2019[S]. 北京:中国 标准出版社,2019:22-23.
- [6] 孙慧,黄赟,鲁宝全,等. 基于欧盟标准的某型轻卡昼间行 车灯控制策略[J]. 轻型汽车技术,2018(3):3-7.
- [7] 林建.符合欧盟标准的后雾灯控制逻辑分析[J]. 机电技 术,2016(1):100-102.
- [8] 高漪安,姚灿,张明娟,等. 汽车大灯远光灯自动控制系统[J]. 内燃机与配件,2021(11):227-228.
- [9] 韩庆福,郭鹏,张静,等. 基于车身控制器的昼间行车灯控制策略[J]. 汽车电器,2016(6):24-27.
- [10] 张礼宪,张景涛,王程鹏,等.昼间行车灯智能控制系统设 计[J].客车技术与研究,2019,41(2):34-36.
- [11] 李朝琪. 豪沃 HW7C 电气系统前照灯控制策略浅析[J]. 汽车电器,2019(7):66-67.

(上接第48页)

参考文献:

- [1] 王霄锋. 汽车悬挂和转向系统设计[M]. 北京:清华大学出版社,2015:118-130.
- [2] 陈为欢. 汽车钢板弹簧 CAE 仿真分析与台架试验对标研 究[J]. 机械强度,2023,45(4):845-849.
- [3] 王其东,方锡邦,钱立军,等.基于虚拟样机技术的汽车钢板弹簧设计及分析研究[J].机械工程学报,2001(12):63-66.
- [4] 刘辉. 基于有限元的某钢板弹簧疲劳寿命分析与研究 [D]. 淄博:山东理工大学,2017.
- [5] 樊翠连,李舜酩,张袁元. 钢板弹簧刚度特性及接触摩擦的
 非线性有限元分析[J]. 噪声与振动控制,2012,32(3):16
 -20.

- [6] 马坚. 汽车钢板弹簧设计的非线性振动有限元分析[J]. 客车技术与研究,2004,26(3):8-9.
- [7] 刘攀. 重卡钢板弹簧的有限元分析[D]. 西安:长安大学, 2016.
- [8] 李小明,陈文彬. 客车多片簧悬架系统的设计[J]. 客车技 术与研究,2015,37(6):28-31.
- [9] 孙训方. 材料力学:第4版[M]. 北京:高等教育出版社, 2002:202-236.
- [10] 全国弹簧标准化技术委员会. 钢板弹簧 技术条件:GB/T 19844—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018:9.
- [11] 毛稼祥,张子正,刘继承,等. 基于试验场关联的钢板弹簧 台架试验研究[C]//中国汽车工程学会. 2022 中国汽车 工程学会年会论文集(5). 北京:机械工业出版社,2022: 92-94.