

某商用车排气系统车身悬挂点强度分析及优化设计

武文星, 宁善平

(广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650)

摘要: 排气系统车身悬架点强度不足严重影响排气系统的运行状态, 从而影响整车的行驶稳定性和舒适性。本研究将有限元分析与有针对性的强度改进相结合, 用以解决某品牌商用车排气系统车身悬架点强度不足的问题。首先建立排气系统有限元分析模型, 基于12种工况进行有限元仿真计算, 准确评估系统在各种工况下的性能。随后进行受力分析和计算, 制定优化解决方案, 改善系统悬架的薄弱环节。最后通过仿真实验和实际应力测试验证改进的有限元模型。实验结果表明, 优化后的排气系统的车身悬挂点强度显著提升, 所受最大应力由556.8 MPa降为268.4 MPa。

关键词: 排气系统; 有限元; 强度; 受力分析; 应力

中图分类号: U 464.134.4

文献标识码: A

Strength Analysis and Optimization Design of Exhaust System Body Suspension Points in a Commercial Vehicle

WU Wenxing, NING Shanping

(Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou 510650, Guangdong, China)

Abstract: Insufficient strength in the body suspension points of the exhaust system significantly affects its operational status, thereby impacting the driving stability and comfort of the entire vehicle. This study employed a novel approach that combines finite element analysis with targeted strength improvements to address the issue of insufficient strength in the body suspension points of the exhaust system for a specific brand of commercial vehicles. By first establishing a finite element analysis model for the exhaust system and conducting finite element simulation calculations based on 12 operating conditions, the system's performance under various scenarios was accurately evaluated. Subsequent force analysis and calculations enabled us to develop optimization solutions aimed at improving the weak areas in the suspension system. Finally, through simulation experiments and actual stress testing, the improved finite element model was rigorously validated. The experimental results demonstrate a significant enhancement in the strength of the body suspension points of the exhaust system after implementing the optimization measures. The maximum stress was reduced from 556.8 MPa to 268.4 MPa.

Key words: exhaust system; finite element; strength; stress analysis; stress

排气系统通常由催化转化装置、消音器、排气管、排气管悬挂等部件构成。其中排气系统悬挂是保证车辆排气系统安装稳定的重要部件, 通常由金属挂钩制作, 一段焊接在车架上, 另一段通过橡胶垫块与车身相连。此外, 排气系统与发动机通常通过螺栓刚性联接, 发动机所传递的激

励很容易通过排气系统传导至车身, 从而引发整个车辆的振动恶化, 影响车辆行驶的平顺性和舒适性。因此, 对排气系统悬挂进行强度分析非常重要。

近年来, 众多学者针对排气系统的悬挂分析开展了研究和分析。上官文斌等对排气系统吊耳

收稿日期: 2023-11-30

作者简介: 武文星, 高级工程师, 硕士, 研究方向为车辆动力学优化

动刚度优化进行研究,提出了一种基于排气系统动态载荷最小、吊耳可靠性最好的排气系统吊耳动刚度优化模型^[1];赵闵清等运用二次响应拟合法对排气系统可靠性进行数学建模,运用改进蚁群算法对排气系统的吊耳布置进行了优化,取得了较好的效果^[2];高志彬运用平均驱动自由度位移法(ADDOFD)对排气系统吊钩位置进行了优化,并对优化后的设计进行了验证^[3];刘飞等运用湍流模型,分析排气系统的内流场特性,对排气系统结构进行了优化设计^[4]。

由于上述研究在排气系统动态受力方面工作还不尽完善,且ADDOFD法不足以解决排气系统强度问题,本文采用一种将有限元分析与有针对性的强度改进相结合的方法,用以解决某品牌商用车排气系统车身悬架点强度不足的问题。通过建立排气系统有限元模型,采用12种典型工况的有限元分析计算找出强度不足的位置;然后以强度不足位置作为研究对象进行受力分析,基于受力分析结果对该位置进行优化设计。结果显示,优化后的强度显著提升,满足屈服强度要求。

1 排气系统有限元模型

首先对该品牌汽车的排气系统建立有限元模型,模型如图1所示。然后对该模型进行网格和节点划分,本研究结合材料及实际情况,以5 mm划分矩形网格,整个排气系统公用单元数34 891个,共用节点数34 867个,验算模型质量为67.4 kg,模型详细信息如表1所示。^[5]

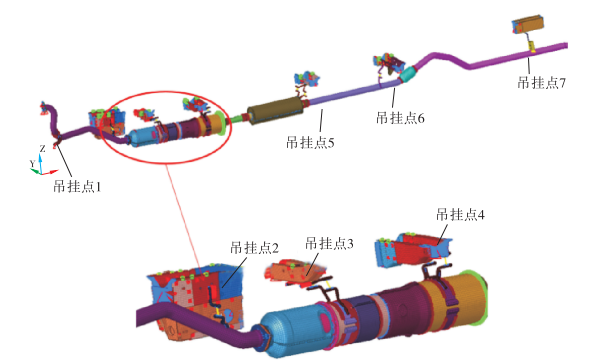


图1 排气系统有限元模型

表1 排气系统有限元模型信息

CAE模型版本	模型重量/kg	节点数/个	单元数/个
TG1	67.4	34 867	34 891

2 仿真工况与有限元仿真计算结果

进一步对该有限元模型进行网格和节点属性

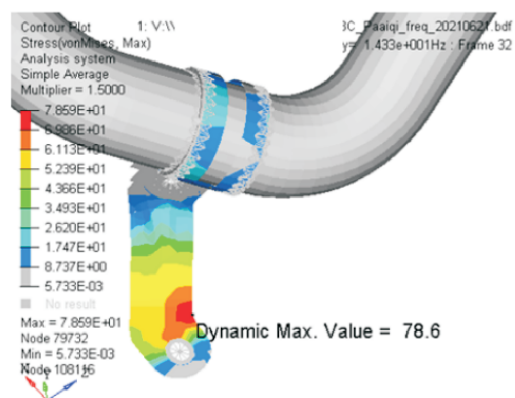
划分,由于排气系统大部分部件由成型金属板材制作,使用2D壳单位(PSHELL)对这些组件进行建模。其他小部件,如吊杆和法兰面连接螺母,则使用三维实体元素(PSOLID)建模,对悬挂位置施加7个DOF约束,如图1中标注所示。同时选定如下12个典型工况进行仿真模拟。工况描述如表2所示,表右侧数值为该工况下各个方向加载的加速度值。xyz方向与整车坐标系保持一致。

表2 仿真工况表

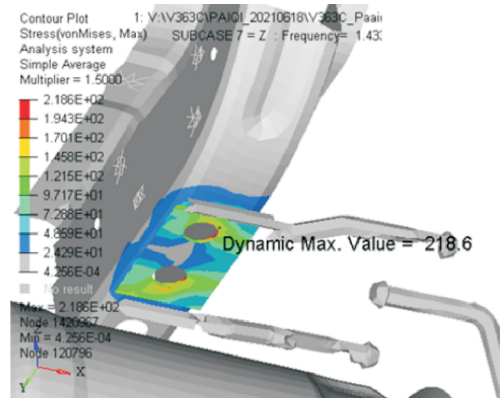
序号	工况名称	x/g	y/g	z/g
1	静止工况	0	0	-1
2	发动机最大前进扭矩 & 左转	0	1	-1
3	发动机最大前进扭矩 & 左转	0	-1	-1
4	发动机最大前进扭矩 & 垂直向下冲击	0	0	-2
5	发动机最大前进扭矩 & 垂直回弹	0	0	1
6	发动机最大后退扭矩 & 后退加速	-0.5	0	-1
7	横向向左正弦加载	0	-0.5	-1
8	横向向右正弦加载	0	0.5	-1
9	前进正弦加载	1	0	-1
10	后退正弦加载	-1	0	1
11	转弯 & 制动	1	1	0
12	转弯 & 制动 & 弹跳	1	1	2

本研究对表2中的12种工况进行有限元分析,有限元仿真分析结果如图2所示,图上方为悬挂点仿真分析受力云图,下方为对应的频谱应力计算结果图。由频谱应力计算结果发现,表2中序号12的转弯 & 制动 & 弹跳工况仿真分析结果动态应力值最大,详细计算结果如表3所示。

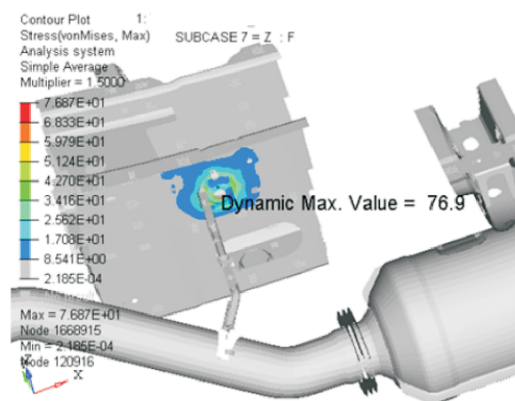
由图2有限元分析结果可得表3中计算结果。其中1#悬挂点在频率13.87 Hz时产生最大应力为78.6 MPa,2#悬挂点在频率14.32 Hz时产生最大应力76.9 MPa,3#悬挂点在频率14.47 Hz时产生最大应力218.6 MPa,4#悬挂点在频率14.53 Hz下产生最大应力295.4 MPa,5#悬挂点在频率14.48 Hz下产生最大应力159.9 MPa,6#悬挂点在频率10.14 Hz下产生最大应力556.8 MPa,7#悬挂点在频率15.17 Hz下产生最大应力268.4 MPa。对比发现,6#悬挂动态应力峰值虽未超过材料抗拉强度极限,但远超材料屈服极限,判定该位置具有一定强度风险。由此基于CAE分析结果,选取6#悬挂焊接位置作为主要研究对象进行受力分析。



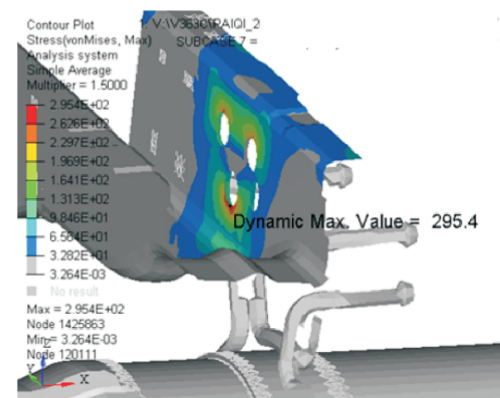
(a) 1#悬挂有限元应力分析结果图



(c) 3#悬挂有限元应力分析结果图

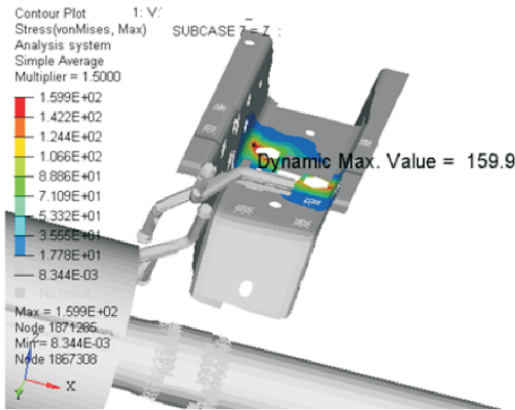


(b) 2#悬挂有限元应力分析结果图

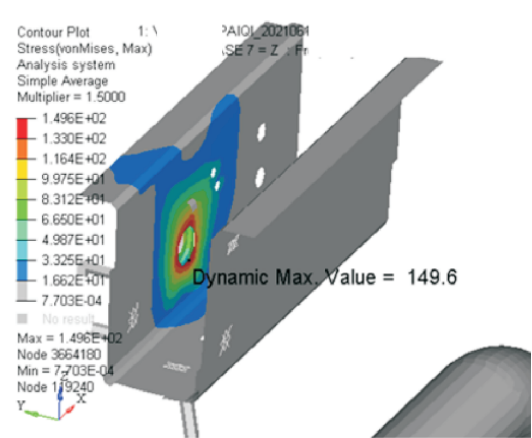


(d) 4#悬挂有限元应力分析结果图

图2 排气系统悬挂转弯 & 制动 & 弹跳有限元分析结果图

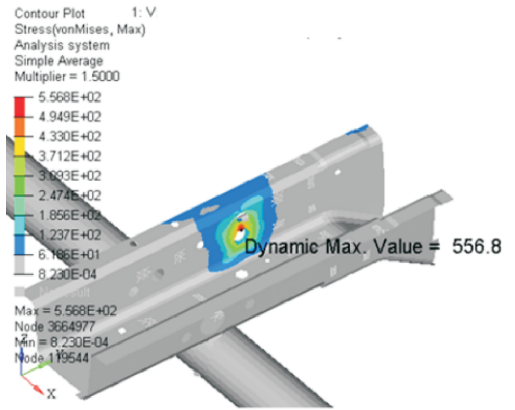


(e) 5#悬挂有限元应力分析结果图



(g) 7#悬挂有限元应力分析结果图

图2 排气系统悬挂转弯 & 制动 & 弹跳有限元分析结果图 (续图)



(f) 6#悬挂有限元应力分析结果图

表3 有限元分析结果统计表

悬挂点序号	最大应力/MPa	材料屈服/MPa	材料名称
悬挂点 1#	78.6	< 235	Q235
悬挂点 2#	76.9		
悬挂点 3#	218.6	< 950	HC950/1300HS
悬挂点 4#	295.4		
悬挂点 5#	159.9	< 220	HC220Y
悬挂点 6#	556.8	< 420	HC420/780DP
悬挂点 7#	268.4		

3 悬挂安装位置受力分析与改进设计

3.1 悬挂安装位置受力分析

基于表3有限元分析计算结果,在要求不过分增加车架质量的前提下,优先选择增加焊接钣金件的方法进行受力优化。由于悬挂空间布置限制,焊接钣金件的长度和宽度分别设计为20 mm和14 mm。如果厚度设计值过小,不足以改善悬挂点受力,反之则可能引起应力集中并增加质量,因此,厚度指标需对悬挂安装位置进行受力

分析来确定,计算方法如下。

首先,采用简化公式法进行加强钣金的屈曲安全因子计算,临界屈曲应力的计算公式为:

$$\sigma_o = k_x C_1 \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad (1)$$

式中: k_x 为受压和弯曲屈曲系数; C_1 为边界约束系数; t 为加强钣金厚度; s 为加强钣金的宽; E 为材料的弹性模量; ν 为材料泊松比,对钢材来说, $\nu=0.3$ 。

双向压缩+剪切状态下屈曲系数的计算公式为:

$$k_x = \frac{1}{\sqrt{(1+k_1^2+k_2^1)}} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \quad (2)$$

式中, $k_1 = \frac{\sigma_y/\sigma_o}{\sigma_x/\sigma_o}$, $k_2 = \frac{\tau_{xy}/\tau_o}{\sigma_x/\sigma_o}$, σ_x, σ_y 为 x 及 y 向上的应力平均值, τ_{xy} 为平均剪切应力, τ_o 为剪切最大应力。

然后,对式(1)(2)联立求解,结果见图3。求解结果显示,钣金厚度在2 mm范围内时,应力值最小,由此初步设定钣金厚度为2 mm,进行后续试验验证分析。

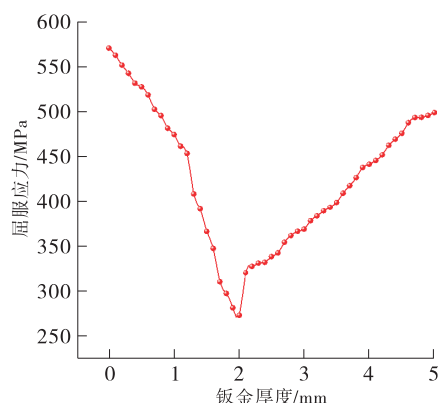


图3 求解结果

3.2 悬挂安装位置改进设计

基于上述图3钣金厚度计算结果,对6#悬挂的安装位置通过焊接加强钣金件的方式进行优化,优化效果见图4。其中加强钣金件长20 mm,宽14 mm,厚2 mm,材料为Q235A。

对优化后的排气系统进行有限元仿真分析,分析结果见图5。有限元仿真分析结果表明,对6#挂钩进行优化后,其最大动态应力由556.8 MPa降为268.4 MPa,并与图3中求解结果接近,同时满足材料屈服强度极限。

进一步对优化后6#吊钩位置采用电测法对其进行应力数据采集,传感器安装照片见图6。所测

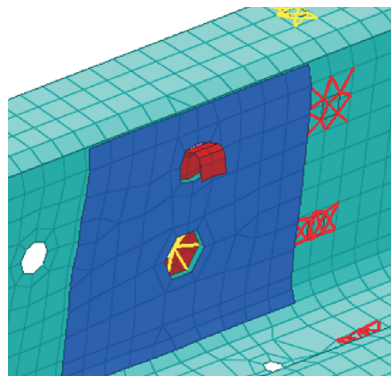


图4 安装位置内侧增加钣金件

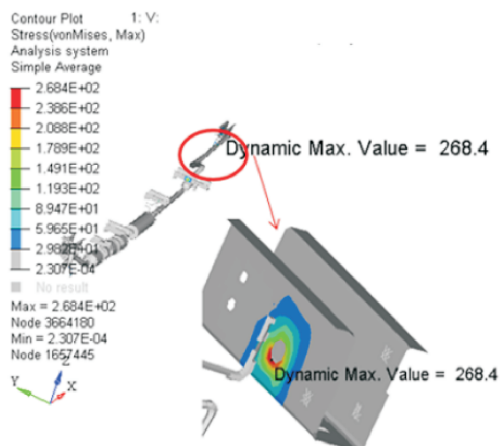


图5 优化后排气系统工况12有限元分析结果图

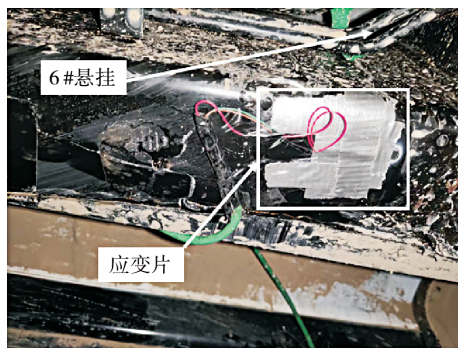


图6 传感器试验照片

量车辆的 x 及 y 向的应力数据见图 7。测量数据显示:车辆行驶在该工况下, x 向应力最大值为 118.7 MPa, y 向应力最大值为 263.1 MPa, 综合应力为 288.63 MPa, 测试结果满足材料屈服强度极限。

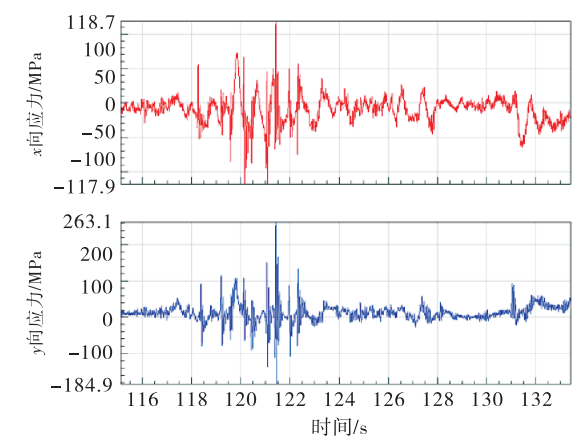
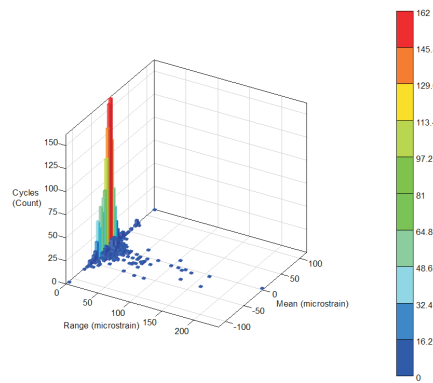
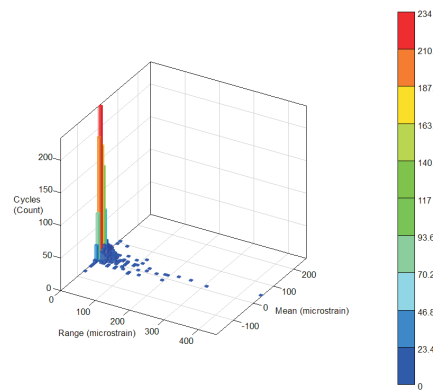


图7 应力时域信号



(a) x 向应力雨流计算结果图



(b) y 向应力雨流计算结果图

图8 雨流计算结果图

对应力时域信号进行雨流计数分析, 结果见图 8。

由图 8 可知, 应力显著满足正态分布, 且较循环数较多的力值较小, 均值分布在 0 点附近, 这种受力情况能够较好地满足结构的疲劳耐久性能。

4 结论

本文针对排气系统悬挂点强度不足问题进行了研究及改进设计:

(1) 通过对排气系统悬挂点进行有限元分析, 采用 12 种工况对其动态应力进行了计算, 有限元分析结果表明: 在转弯 & 制动 & 弹跳工况下, 排气系统 6# 悬挂动态应力值最大达 556.8 MPa, 远超材料屈服强度极限, 存在强度不足风险。

(2) 基于有限元分析结果, 选取 6# 悬挂作为主要研究对象, 对其进行受力分析, 受力分析表明强度不足风险原因为钣金厚度不足。基于受力计算结果暂定对风险位置处增加 2 mm 厚钣金加强板。

(3) 对优化后的悬挂进行试验验证, 有限元仿真计算表明, 在相同工况下, 最大动态应力结果由 556.8 MPa 降为 268.4 MPa, 降低 51.8%。实际应力采集试验结果显示: x 向应力最大值为 118.7 MPa, y 向应力最大值为 263.1 MPa, 综合应力为 288.63 MPa, 测试结果满足材料屈服强度极限。

参考文献:

[1] 上官文斌, 黄志, 贺良勇, 等. 汽车排气系统吊耳动刚度优化方法的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 100-102, 152, 239-240.

[2] 赵闵清, 鲁宇明, 李成林, 等. 一种新的车辆排气系统的可靠性优化设计方法[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3): 432-438.

[3] 高志彬, 陈守佳, 刘志红, 等. 汽车排气系统吊钩位置优化[J]. 机械设计与制造, 2023(12): 45-48.

[4] 刘飞, 韩冰, 尤建国. 发动机排气系统结构优化设计与仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2023(5): 287-291.

[5] 赵闵清, 鲁宇明, 陈文刚, 等. 某轻型卡车驾驶室地板强度分析研究与改进[J]. 机械强度, 2021, 43(5): 1134-1140.