基于骨架开口变形的客车蒙皮开裂问题的分析与优化

荆振洋，黄李冰，黄家赞
（珠海广通汽车有限公司，广东 珠海 519090）

摘 要：为解决某客车顶盖蒙皮开裂问题，本文提出以8种典型运行工况下车身骨架开口对角线相对位移变化率为评价指标的解决方法。通过初步计算并结合自适应响应面法进行车身骨架结构的优化设计，实现了在未增重的情况下，骨架开口对角线相对位移变化率低于0.2%的目标，且蒙皮未再出现开裂现象。

关键词：蒙皮开裂；车身骨架；开口变形；结构优化
中图分类号：U463.83⁺2 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2024)05-0046-05

Analysis and Optimization of Bus Skin Cracking Problem Based on Skeleton Opening Deformation

JING Zhenyang, HUANG Libing, HUANG Jiazan
(Zhuhai Guangtong Automobile Co., Ltd., Zhuhai 519090, China)

Abstract: To solve the skin cracking problem of a bus top cover, this paper presents a solution that takes the relative displacement change rate of the bus body skeleton opening diagonal as the evaluation index under eight typical operating conditions. The optimal design of the bus body skeleton structure is carried out by preliminary calculation and the combination of the adaptive response surface method. Under the no-gaining weight situation, the relative displacement change rate of the skeleton opening diagonal is less than 0.2%, and the skin does not crack again.

Key words: skin cracking; body skeleton; opening deformation; structure optimization

客车车身蒙皮是覆盖于客车车身骨架外部的一层薄板结构，客车车身骨架是由薄壁管材构成的高次超静定复杂结构，两者通过焊接技术进行连接。为确保安全可靠，车身结构需满足刚度性能指标要求，避免出现因刚度不足导致弹性变形过大的情况[1]。而开口变形是车身刚度的一个重要评价指标，应在合理的范围内。若车门骨架处的开口变形过大，不仅会出现车门卡死等问题，还会导致该部位应力过大[2]。因此，车身骨架开口的变形情况，可间接反映其附着蒙皮的受力状态。

目前，国内外大部分针对客车车身结构与蒙皮的相关研究主要侧重于蒙皮对车身结构性能的影响[3-4]，而通过优化车身骨架结构达到规避蒙皮开裂方面的相关研究相对较少。本文对某8.5 m新能源客车车身结构进行有限元仿真分析，以右侧中门上部的顶盖骨架开口对角线相对位移变化率作为评价指标来反映该处骨架的变形情况，并对车身骨架结构进行优化设计，以规避车身蒙皮开裂问题。

1 车身结构有限元仿真分析

1.1 有限元模型的搭建

使用HyperWorks建立客车车身结构的有限元模型[5]。车身骨架是空间薄壁杆系结构，采用10 mm的壳单元对其进行网格划分。为提高计算效率，需要对车身结构进行处理，通过mass与reb3的组合单元对蒙皮、内外饰附件等零部件进行配重模拟替代网格

收稿日期：2024-03-07。
第一作者：荆振洋（1988—），男，高级工程师；主要从事新能源汽车的结构优化、热管理研究工作。E-mail：yaqi.j@qq.com。

划分，以减少计算节点。另外，忽略玻璃、舱门等不起承载作用的结构。以焊点单元 CWELD 模拟车身骨架的缝焊、塞焊等车身骨架的连接，以刚性单元模拟悬挂系统与车身结构的焊接。

车身骨架材料为 Q355 和 T700，将材料属性统一设定为：密度 7.9E－9 t·mm^{-3}，弹性模量 210 000 MPa，泊松比 0.3。最终搭建的车身结构有限元模型如图 1 所示，其中单元节点数为 1 542 564 个，焊点数为 1 458 473 个。

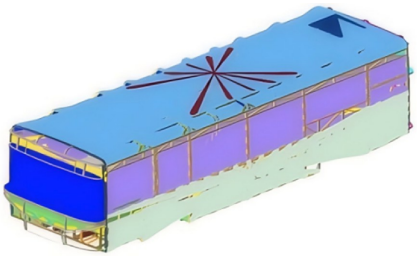


图 1　客车车身结构有限元模型

1.2　计算及结果分析

在车辆运行中发现，该款 8.5 m 新能源客车在右侧中门上部的顶盖蒙皮出现开裂（如图 2 所示）。骨架的变形程度能够间接地反映出其附近蒙皮的受力情况，可为判断其蒙皮是否存在开裂风险提供参考。因此，为规避蒙皮开裂风险，对该车的车身右侧中门上部的顶盖骨架变形情况进行静力分析[6]，分析工况和载荷（表 1），以惯性释放法为边界约束，分析时以开口对角线相对位移变化率低于 0.2% 作为评价指标[7]进行讨论。

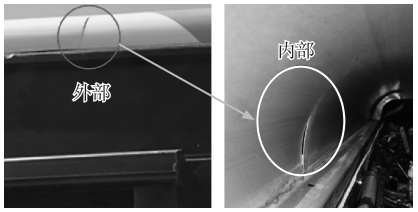


图 2　右侧中门上部开裂示意图

完成工况设置后，提交 OptiStruct 求解器计算。在右侧中门上部的顶盖骨架开口位置选取测量点（图 3 中的 A－a、B－b、C－c、D－d），在后处理 HyperView 软件中查看并提取结果，得到如图 4 所示的各工况下开口对角线相对位移变化率曲线图。

表 1　分析工况（g 重力加速度）

工况编号	工况名称	各方向惯性载荷系数		
		X/g	Y/g	Z/g
1	垂向 3g	0	0	3
2	向前制动 0.8g	0.8	0	1
3	向后制动 0.6g	−0.6	0	1
4	转向 0.5g	0	0.5	1
5	（转向+制动）0.4g	0.4	0.4	1
6	制动+转向+冲击	0.3	0.4	2
7	对角扭转 1g	0	0	2
8	过坑制动	1	0	2

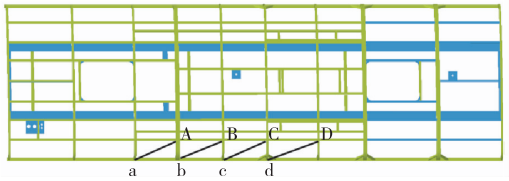


图 3　顶盖右侧中门上部骨架开口位置测量点

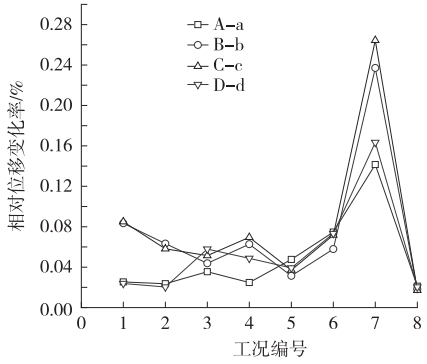


图 4　各工况下开口对角线相对位移变化率曲线

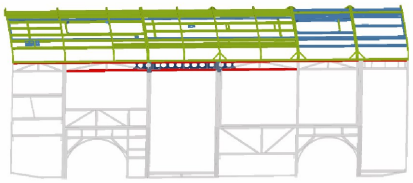
由图 4 可知，4 个开口对角线相对位移变化率最大值均发生在工况 7，在顶盖中门上部 B－b 和 C－c 位置处的相对位移变化率分别为 0.237% 和 0.264%，超过了目标值（0.2%）。由此可判断中门上部的顶盖骨架开口变形较严重，间接反映出该处蒙皮受到较大的力，导致此处蒙皮开裂，且开裂位置与实车破坏位置一致。

2　车身结构优化

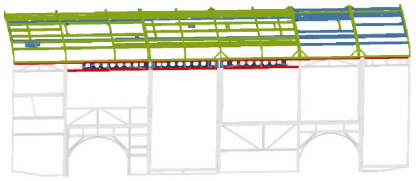
2.1　中门处骨架结构改进

蒙皮开裂出现于右侧中门上部顶盖，初步分析认为可能是由于中门处骨架结构薄弱引起的。基于工

程经验,先对中门开口上部的封板进行结构改进,设计两种方案:①将封板由 3 mm 加厚至 5 mm,如图 5(a)所示;②将封板左右两端延长,如图 5(b)所示。



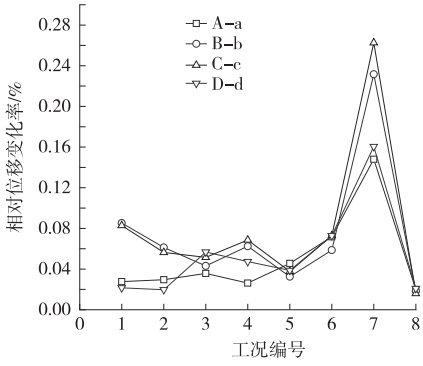
(a) 方案①



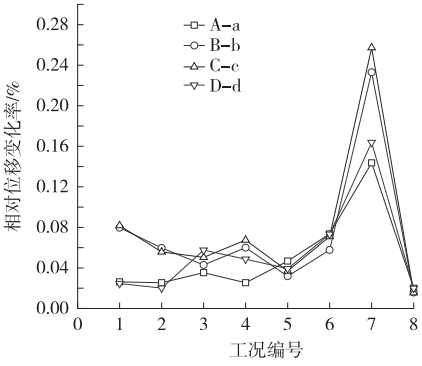
(b) 方案②

图 5 右侧中门封板改进方案

对两种方案进行相同的仿真计算,并在仿真结果中提取相同测量点的数据,得到两种方案在 8 种工况下的开口对角线相对位移变化率曲线(图 6)。



(a)方案①



(b) 方案②

图 6 开口对角线相对位移变化率曲线

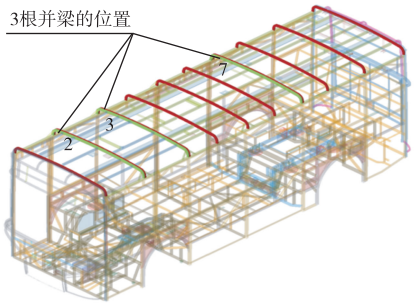
由图 6 可知,在工况 7 下,方案①和方案②在 B-b 处的相对位移变化率分别为 0.232%、0.233%,在 C-c 处分别为 0.263%和 0.257%;与改进前的原模型对比,发现针对中门上部封板进行结构改进的效果甚微,相关开口变形率仍未达标。经市场实车验证,采用方案①或方案②进行改进后的顶盖蒙皮在相同位置再次出现开裂。因此,需要采取另外的改进措施。

2.2 顶盖结构优化

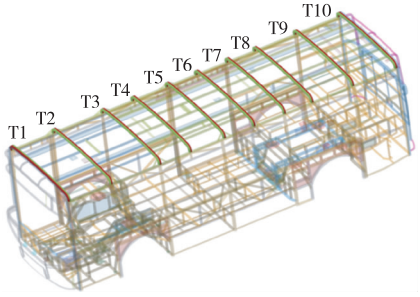
为了提高车身在工况 7(对角扭转 1g)下的抗扭性能,对原模型的顶盖横梁结构进行优化。

2.2.1 优化模型的建立

该车身顶盖原有 10 根横梁,其中 3 根是并梁(从左往右数的第 2、3、7 位置处),如图 7(a)所示。考虑将并梁数目增加至 10 根(即在原模型基础上,从左到右依次补全其余 7 根梁与原顶盖横梁并接),梁的管材初始厚度为 1.5 mm。



(a) 原模型顶盖横梁的位置



(b) 10 根顶盖并梁的位置及编号设置

图 7 车身顶盖骨架结构示意图

将模型导入 HyperStudy 优化平台,以 10 根顶盖并梁为设计对象,完成对其壁厚上下限的取值,并设置编号,如图 7(b)所示。通过优化算法进行并梁最优位置匹配,以达到在工况 7 条件下,中门上部的顶盖骨架开口对角线相对位移变化率低于 0.2%的目标值。

结构优化是通过 HyperStudy 软件提供的求解器进行迭代寻优[7-9]。而在实际工程应用中，可使用响应面拟合得到的近似模型[10]替代实际仿真模型来预测结果，不仅能减少对计算资源的占用，而且能快速得到响应的估计值，大大提高求解效率。其中自适应响应面法（ARSM）[11]使用的混合优化引擎可消除对离散设计变量的数量和取值水平的限制，且其工作效率高，收敛速度快，可在有限时间内利用响应面寻找到一个最优解[12]。

本文基于自适应响应面法的结构优化遵循总质量最小化的原则，尽可能降低中门上部的顶盖骨架开口对角线相对位移变化率。其结构优化数学模型如下：

目标函数　$\min\ m(x_i)$

约束条件　$R_1 \leqslant 0.2$；

$R_2 \leqslant 0.2$；

设计变量　$x=\{0.01,1.5,2\}$

式中：$m(x_i)$为车身质量函数；R_1 为 B-b 对角线的相对位移变化率；R_2 为 C-c 对角线的相对位移变化率；x 为设计变量的离散值，当取并梁的管材厚度为 0.01 mm 时，近似代表该位置取消添加并梁。

2.2.2　优化结果分析

经 HyperStudy 求解计算，得到的寻优结果见表 2。

表 2　寻优结果数据

迭代次数	壁厚/mm										质量/t	相对位移变化率/%		condition
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10		B-b	C-c	
1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.870	0.252	0.190	Violated
2	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.258	0.187	Violated
3	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.252	0.191	Violated
4	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.255	0.188	Violated
5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.258	0.188	Violated
6	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.253	0.179	Violated
7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	14.872	0.246	0.171	Violated
8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	1.5	14.872	0.241	0.188	Violated
9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	1.5	14.872	0.261	0.193	Violated
10	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	14.872	0.255	0.193	Violated
11	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	14.872	0.250	0.191	Violated
12	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2.0	1.5	0.01	0.01	0.01	14.835	0.171	0.205	Violated
13	0.01	0.01	0.01	0.01	1.5	1.5	1.5	0.01	0.01	0.01	14.838	0.161	0.188	Optimal

由表 2 可知，通过自适应响应面算法优化迭代到第 13 次，得到一组寻优解方案{T1，T2，T3，T4，T5，T6，T7，T8，T9，T10}={0.01，0.01，0.01，0.01，1.5，1.5，1.5，0.01，0.01，0.01}，表示将顶盖 T5、T6、T7 横梁改为壁厚为 1.5 mm 的并梁，其余横梁改为或保持为单梁，壁厚不变。而 T5、T6、T7 横梁恰好是中门正上方位置。此时，质量为 14.838 t，B-b 和 C-c 的相对位移变化率分别为 0.161%和 0.187%，满足低于 0.2%的要求。

将上述寻优解代入实际仿真模型进行仿真计算，提取优化后各工况骨架开口对角线相对位移变化率，得出如图 8 所示曲线。

由图 8 可知，顶盖横梁优化后，在工况 7 下 B-b 开口位置的相对位移变化率为 0.167%，C-c 开口位置的相对位移变化率为 0.176%，降低比例分别为 29.5%和 33.3%；其余工况下开口对角线相对位移变化率虽略有变化，但仍保持在目标范围内。优化后的车身总质量保持不变，仅改变了顶盖并梁的布置位置。

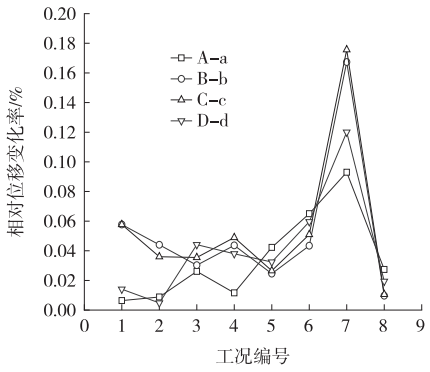


图 8 优化后各工况开口变化率曲线

进一步将上述自适应响应面近似拟合模型寻优结果与有限元实际模型仿真结果数据进行对比(表 3),可看到两者结果的误差值低于 6%,满足工程应用需求。

表 3 算法拟合与有限元仿真结果数据对比

模型	质量/t	相对位移变化率/%	
		B-b	C-c
近似拟合模型	14.838	0.161	0.187
有限元实际模型	14.841	0.167	0.176
误差/%	0.02	3.73	5.88

3 结束语

本文针对客车中门上部蒙皮开裂问题,以骨架开口对角线相对位移变化率为评价指标,经有限元分析发现了超标点,并通过自适应响应面算法进行迭代寻优,使其变形率分别降低了 29.5%和 33.3%,满足目标限值,且未增加骨架总质量。经长期市场检验,蒙皮未再出现开裂。

参考文献:

[1] 于国飞,黄飞,王海兵,等. 客车车身骨架刚度有限元分析及改进设计[J]. 客车技术与研究,2016,38(1):29-32.

[2] 庞建武,刚宪约,柴山,等. 一种基于强度理论的大客车开口变形分析新方法[J]. 农业装备与车辆工程,2012,50(3):19-22.

[3] 王闻佳,张扬,桂良进,等. 蒙皮和固定玻璃对客车车身结构力学性能的影响[J]. 汽车工程,2008,30(7):605-607.

[4] LI Qiang,SHEN Fulin,YU Hongwei,et al. Effect of Bus Skin on Rollover Crash Simulation Outcomes[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition),2012,6(2):106-110.

[5] 曾锋. 基于 HyperWorks 的轻型客车结构轻量化设计[J]. 客车技术与研究,2020,42(3):37-40.

[6] 荆振洋,胡亮文. 基于多体模型载荷分解的物流车骨架强度分析[J]. 汽车科技,2022(5):68-73.

[7] 周雨新,朱红军,冒李宸. 基于静动态有限元分析的客车骨架结构优化[J]. 客车技术与研究,2023,45(4):40-44.

[8] 刘建,陈勇,曹洲. 考虑剪切变形影响的开口薄壁梁约束扭转的扭转角分析[J]. 应用力学学报,2016,33(4):678-683.

[9] 姜立标,张静远. 基于多目标优化的某型大客车骨架轻量化研究[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(3):85-91.

[10] 张贺,葛晓波,李勇,等. 基于自适应近似模型的液压挖掘机轻量化设计[J]. 计算机集成制造系统,2023,29(12):4051-4062.

[11] 张健,吕俞祥,李家俊,等. 基于响应面的白车身轻量化多目标优化设计[J]. 建模与仿真,2023,12(4):3781-3793.

[12] 黄登峰,王靖安,林光磊,等. 基于自适应响应面法的长规格铝合金厢式半挂车轻量化研究[J]. 铝加工,2023(1):64-72.