拓扑优化设计在客车白车身刚度提升中的应用

庄首吉
（厦门金龙旅行车有限公司，福建 厦门 361022）

摘 要：建立某客车白车身有限元仿真模型，对其进行刚度仿真分析，并使用拓扑优化方法对地板骨架及行李舱骨架进行优化设计。在不增加重量的前提下，有效提升客车白车身的刚度性能。

关键词：客车白车身；刚度提升；拓扑优化
中图分类号：U463.82⁺2；U462.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2022)06-0034-04

Application of Topology Optimization Design to Bus BIW Stiffness Improvement

ZHUANG Shouji
(Xiamen Golden Dragon Bus Co., Ltd., Xiamen 361022, China)

Abstract: The finite element simulation model of a bus body in white is established and its stiffness is simulated and analyzed. The floor skeleton and luggage compartment skeleton are optimized and designed with the topology optimization method. The stiffness performances of the bus body in white is effectively improved without increasing the weight.

Key words: bus body in white; stiffness improvement; topological optimization

拓扑优化技术是指在给定的设计空间内找到最佳的材料分布或者传力路径，从而在满足各种性能的条件下得到重量最轻的设计[1]。白车身刚度是评价车辆设计可靠性和整车舒适性的重要指标之一，白车身刚度分析是整车开发中必不可少的环节[2]。本文以某客车白车身(BIW)为研究对象，建立其有限元模型，分析其弯曲刚度和扭转刚度；同时利用拓扑优化技术，以白车身骨架刚度为优化目标，对白车身骨架结构进行拓扑优化，从而有效提高白车身刚度性能。

1 白车身刚度计算

1.1 有限元模型的建立

本文对某 12 m 客车进行分析，其骨架为全承载式结构，悬架为前 2 后 4 气囊空气悬架，整车整备质量 13 t，轴距 6 m。利用 Hypermesh 对白车身骨架进行网格划分，骨架中的型材构件用四边形 CQUAD4 和三角形 CTRIA3 壳单元。白车身有限元模型如图 1 所示。

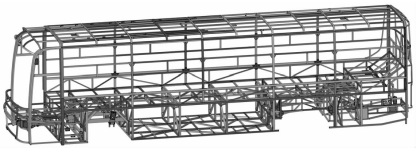


图 1 白车身有限元模型

样车前后围骨架使用 Q345 材料，其余骨架使用 Q700 材料。

1.2 约束条件及载荷施加

白车身的静刚度一般包括弯曲刚度和扭转刚度，弯曲刚度可由车身的最大垂直挠度来衡量，扭转刚度由车身轴间相对扭转角来衡量。

1)弯曲刚度分析。将前悬气囊在骨架上的安装位置及后悬气囊在骨架上的安装位置的中点(通过刚性单元与后悬前后气囊盖板连接，起到同步约束气囊安装点的作用)作为约束点，均约束 X、Y、Z 三个方向的平动自由度。选取上部地板骨架梁上 X 方向距离

收稿日期：2022-08-12。

第一作者：庄首吉(1990—)，男，硕士；工程师；主要从事客车结构强度分析工作。E-mail：zhuangshouji@xmjl.com。

原点 1/2 轴距的一个节点,在这个节点上施加竖直向下 10 000 N 的力,如图 2 所示。

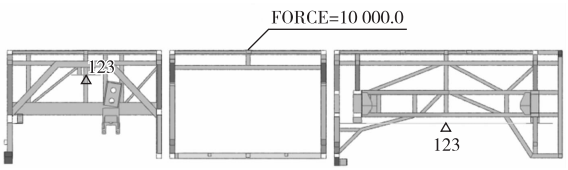
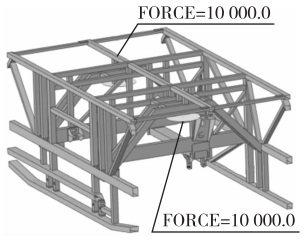
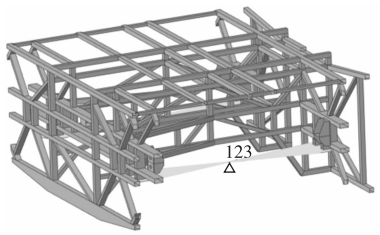


图 2　弯曲约束及加载

2) 扭转刚度分析。后悬气囊在骨架上的安装位置的中点作为约束点,约束 X、Y、Z 三个方向的平动自由度。前悬气囊在骨架上的安装位置为节点,在左右侧节点上分别施加与竖直方向相反的 10 000 N 的力,如图 3 所示。



(a)前悬处



(b)后悬处

图 3　扭转约束及加载

1.3　结果计算与分析

1.3.1　弯曲刚度计算

应用式(1)计算出整车的弯曲刚度 K_w:

$$K_w = PL^3/(48\delta) \tag{1}$$

式中:δ 是白车身骨架 Z 向最大变形量,通过后处理软件 Hyperview 的弯曲工况 Z 向位移云图(图 4)可得 δ=3.26 mm;L 是前后约束点距离 6 000 mm(即轴距);P 是施加的载荷 10 000 N。

将以上数据代入式(1)计算得到弯曲刚度为 1.38×10^7 N·m^2。

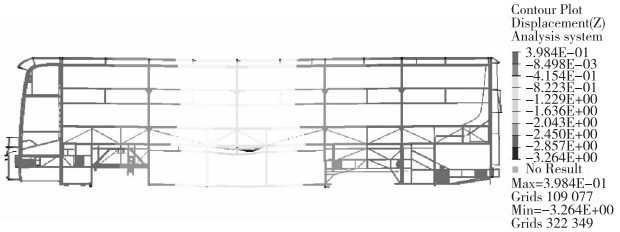


图 4　白车身骨架弯曲工况 Z 向位移云图

1.3.2　扭转刚度计算

根据日本统计资料表明,汽车轴距与扭转刚度的正比关系统计曲线如图 5 所示[3],因此本文采用考虑轴距的方法计算扭转刚度。

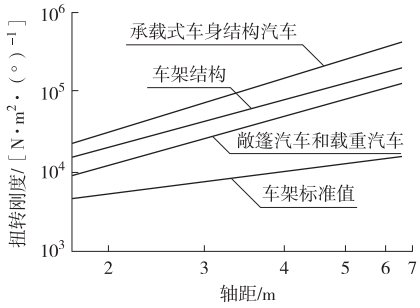


图 5　轴距与扭转刚度的关系曲线

利用前悬左右悬架的空气弹簧支点的 Z 向变形量来计算整体的扭转刚度 K_n,公式见式(2)。

$$K_n = \frac{TL}{\theta},\ \theta = \frac{\delta_L - \delta_R}{B} \tag{2}$$

式中:θ 为扭转角;δ_L、δ_R 分别为前悬架左、右空气弹簧支点的 Z 向变形量,通过后处理软件 Hyperview 的扭转工况 Z 向位移云图(图 6)可得 δ_L=-4.118 mm、δ_R=4.335 mm;$T=P\cdot B$ 是施加的扭矩;P 是施加的载荷,为 10 000 N;B 是前悬左右施力点的间距,为 1 237 mm;L 是轴距,为 6 000 mm。

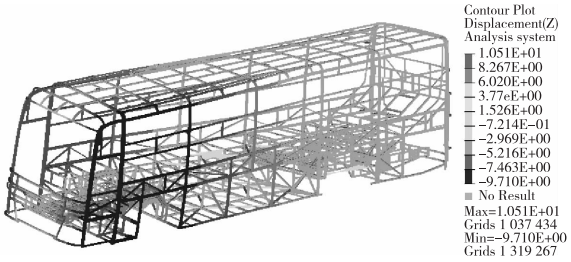


图 6　白车身骨架扭转工况 Z 向位移云图

将以上数据代入式(2)计算得到扭转刚度为

1.09×10^7 N·m²/rad。

参考同类车型刚度水平，将弯曲刚度设定为 1.5×10^7 N·m²，扭转刚度设定为 1.2×10^7 N·m²/rad。当前结构未达到刚度设计要求，需通过结构优化提升白车身刚度。

2 拓扑优化

拓扑优化的基本思想是将寻求结构的最优拓扑问题，转化为在给定的设计区域内寻求最优材料分布的问题，其目的是寻找承受单载荷或多载荷的物体最佳材料分配方案[4]。

根据整车设计，大部分骨架结构已确定，同时为满足碰撞安全要求，选择对碰撞强度影响较小的地板骨架区域及行李舱下骨架区域进行拓扑优化分析。该分析区域为平面结构，可采用壳单元来定义设计空间，并用变密度法来定义材料的流动规律[5]。

拓扑分析计算模型所对应的基本要素主要包括设计变量、目标函数和约束条件。客车结构拓扑设计需要对优化计算模型基本要素明确如下：

1）目标。加权柔度最小（即刚度最大），并依据工况的重要程度，设置不同工况对应的加权系数。

2）约束。根据拓扑优化结果的离散情况，在 0.1~0.3 之间调整不同拓扑区域的质量分数上限。

3）设计变量。变密度法将有限元模型设计空间的每个单元密度指定为相同，以此作为设计变量。该单元密度在 0~1 之间取值，优化求解后单元密度越靠近 1，说明该单元位置越重要，需要保留；单元密度接近 0，表示该单元处的材料不重要，可以除去[6-7]。

经过多次迭代，可以得到符合优化约束和目标函数的最优解。优化结构的材料密度云图如图 7、图 8 所示。

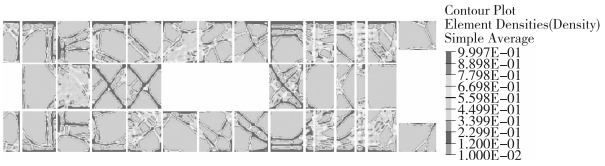


图 7 地板骨架区域的拓扑优化结果

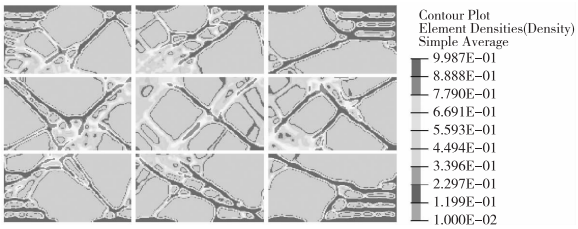


图 8 行李舱下骨架区域的拓扑优化结果

3 结构优化

根据上述拓扑优化结果对结构进行相应优化设计，对优化结果欠缺的部分进行检查和补充。结构优化设计方案如图 9~12 所示。

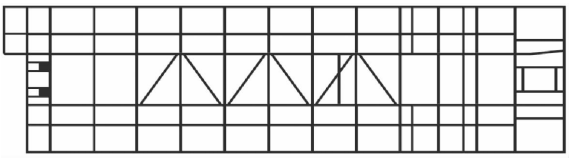


图 9 地板骨架原始方案

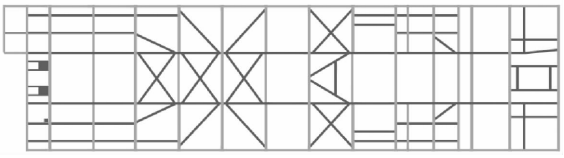


图 10 地板骨架优化方案

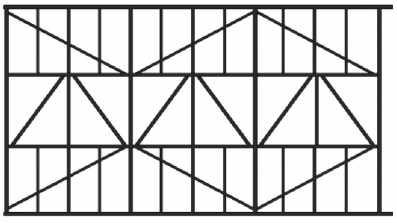


图 11 行李舱原始方案

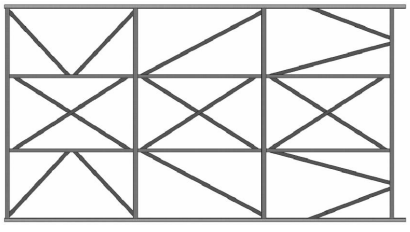


图 12 行李舱优化方案

完成骨架的结构优化设计后，再应用 Optistruct 的静力学分析功能对优化后的骨架结构进行刚度分析。对比原始方案和优化方案，地板骨架及行李舱骨

架质量由 388 kg 减小至 382 kg,白车身弯曲刚度由 1.38×10^7 N·m^2 提升到 1.66×10^7 N·m^2,扭转刚度由 1.09×10^7 N·m^2/rad 提升到 1.25×10^7 N·m^2/rad。在不增加骨架重量的前提下,白车身刚度得到有效提高,达到设计要求。

4　结束语

将拓扑优化设计应用于白车身刚度优化中,能够克服传统设计中的盲目性,提出合理的结构改进方案及思路以指导设计工作,有效地改善白车身刚度性能。

参考文献:

[1] 杨庆华,连志斌. OptiStruct 在白车身刚度优化中的应用[C]//第一届结构及多学科优化工程应用与理论研讨会论文集. 2009:1-3.

[2] 张继伟,胡花. 基于 HyperWorks 的某轿车白车身刚度分析及优化[J]. 科技信息,2011(8):3-4.

[3] 于国飞. 基于有限元的全承载式客车车身强度刚度分析[J]. 客车技术与研究,2010,32(4):14-16.

[4] 崔朝军. 拓扑优化及配套技术在转向系统固有频率调整中的应用[J]. 客车技术与研究,2018,40(4):14-17.

[5]刘庆,侯献军. 基于 HyperMesh/OptiStruct 的汽车零部件结构拓扑优化设计[J]. 装备制造技术,2008(10):42-44.

[6] 洪清泉,赵康,张攀. OptiStrucs & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2013:25.

[7] 孙斌,吴长风,于国飞,等. 纯电动客车底架的拓扑优化设计[J]. 客车技术与研究,2019(5):27-30.

(上接第 5 页)

[5] 杨琨,徐彬,董德宝,等. 氢燃料电池电电混合动力客车能量控制策略仿真研究[J]. 客车技术与研究,2021,43(1):1-3.

[6] 刘世闯,孙桓五,王瑞鑫,等. 大功率型氢燃料电池重卡动力系统匹配设计[J]. 汽车工程,2021,43(2):196-203.

[7] 李广地,吕浩华,袁军,等. 动力锂电池的寿命研究综述[J]. 电源技术,2016,40(6):1312-1314.

[8] 周苏,王克勇,文泽军,等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版),2021,49(1):107-115.

[9] 卢兰光,李建秋,华剑锋,等. 电动汽车锂离子电池管理系统的关键技术[J]. 科技导报,2016,34(6):39-51.

[10] 马璨,吕迎春,李泓. 锂离子电池基础科学问题(VII)——正极材料[J]. 储能科学与技术,2014,3(1):53-65.

[11] 刘新天,李强,郑昕昕,等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术,2021,44(6):81-89.

[12] 郭朋彦,宗贺辉,王一博,等. 氢燃料电池混合动力汽车能量管理系统建模与仿真分析[J]. 汽车电器,2020(1):13-16.

[13] 王诚,王树博,张剑波,等. 车用燃料电池耐久性研究[J]. 化学进展,2015,27(4):424-435.