

拼焊板车门焊缝布置与尺寸优化设计方法研究

陈刚强¹ 李光耀¹ 孙光永^{1,2} 郭瑞泉³

1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

2. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室,重庆,400039

3. 宝山钢铁股份有限公司,上海,201900

摘要:传统拼焊板零件的焊缝线位置的确定是依靠工程经验来进行试错设计的,导致拼焊板的性能得不到充分的发挥。为了提高拼焊板零件的设计水平,集成双向渐进结构优化方法、灵敏性分析方法和尺寸优化方法,提出一套拼焊板零件设计的新方法。应用新方法进行了车门拼焊板系统的设计研究,研究结果表明,在保证拼焊板车门各种刚度性能要求指标下,车门系统减重 12.5%。新方法能有效提高拼焊板零件的设计水平,一定程度上促进我国汽车工业的发展。

关键词:拼焊板;焊缝线;BESO 拓扑优化;尺寸优化;轻量化

中图分类号:U463.82;TP391.9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.021

Research on Layout of Weld Lines and Size Optimization for TWB Doors

Chen Gangqiang¹ Li Guangyao¹ Sun Guangyong^{1,2} Guo Ruiquan³

1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, 410082

2. State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, 400039
3. Baosteel Group Corporation Ltd., Shanghai, 201900

Abstract: In traditional design process, people always determine the location of weld lines of TWB parts by their personal experience or by a lot of trial and error design, leading the performance of TWB can not be brought into full play. So, in order to improve the design of TWB parts, a new method for the design of TWB parts was generated and applied to improve the stiffness of the car, lighten the total weight by 12.5%, which was based on bi-directional evolutionary structural optimization, sensitivity analysis method and size optimization. The proposed method can obtain a good optimization results to improve the projects to a certain extent, it promotes the development of China's automobile industry.

Key words: tailor welded blank(TWB); weld line; BESO topology optimiation; size optimization; lightweight

0 引言

节能、减重、降低排放和提高安全性已经成为现代汽车的重要发展方向,其中汽车轻量化已成

收稿日期:2011-11-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2010CB328005);江苏省道路运载工具新技术应用重点实验室开放基金资助项目(BM2008206007);汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室 2010 年度开放基金资助项目(NVHSKL-201002)

- [12] Kharlamov A I, Kirillova N V, Yatsimirskii V I C. Kinetics of CO Oxidation Over Metal-like Carbides[J]. React. Kinet. Catal. Lett., 1980, 13: 105-110.
- [13] Wang D Y, Weng K W, Chang C L, et al. Synthesis of Cr₃C₂ Coatings for Tribological Applications[J]. Surface and Coatings Technology, 1999, 120/121: 622-62.
- [14] Polman E A, Fransent T, Gellings P J. The Reac-

为 21 世纪汽车技术的前沿和热点,车身质量每减轻 10%,燃油消耗就可降低 6%~8%。汽车轻量化主要有两种途径:一种是采用轻量化材料^[1],另一种是实行结构轻量化^[2]。近年来发展起来的拼焊板技术(TWB)既可以做到零件的复合化,减少零件数量,又可以采用高性能材料对零件进行局部加强。因此,拼焊板技术集成了传统轻量化方法的优点,是一种最有效的轻量化途径。

从文献[3-4]中可以看到,有关拼焊板的研究

tive Element Effect, Ionic Processes of Grain-boundary Segregation and Diffusion in Chromium Oxide Scales[J]. J. Phys. Condens. Matter., 1989, 1: 4497-4510. (编辑 郭伟)

作者简介:吴守军,男,1977 年生。西北农林科技大学水利与建筑工程学院副教授、博士。主要研究方向为先进陶瓷、陶瓷基复合材料、无机涂层。发表论文 20 余篇。桂单明,男,1989 年生。西北农林科技大学水利与建筑工程学院硕士研究生。

主要集中在拼焊板的冲压成形技术方面,如焊缝对材料力学性能、变形特点和成形极限的影响等。直至最近几年,才有部分学者对拼焊板零件的设计进行了研究,如 Shin 等^[5]利用商业优化软件 GENESIS,对车门内板进行了拼焊板拓扑优化设计,结果表明,使用拼焊板技术后内板的质量比优化设计前的普通结构降低了 8.72%。Song 等^[6]使用多学科优化方法对车门内板进行了拼焊板优化设计,最终使得车门内板减轻了 15%。

然而,相关的研究成果还不足以指导拼焊板零件的设计,这大大制约了拼焊板技术的推广与应用。特别是对于焊缝线最优位置的确定还没有一套行之有效的方法,如 Shin 等^[5]采用变密度法对门内板进行拓扑优化得出理论上需要加强的区域,然后根据个人经验大概地确定焊缝线的位置,这样生成的结果存在很大的不确定性。而且 Shin 等使用的变密度法所得的拓扑优化结果有三点不足:①材料分布零散,仅凭设计者主观确定拼焊方式,对拼焊板零件设计并没用较大的实际指导意义;②拓扑优化结果存在大量中间密度,无法满足实际的制造要求;③变密度法拓扑优化方法存在网格依赖性,特别是网格复杂时,网格变化对拓扑结果有较大影响。

为了解决以上问题,提高拼焊板零件的设计水平,本文将双向渐进结构优化方法、灵敏性分析方法和尺寸优化方法应用于车门系统轻量化研究中,针对拼焊板车门系统,开展基于多目标双向渐进结构优化方法的焊缝线确定方法研究,在焊缝线具体位置确定后,运用灵敏性分析方法与尺寸优化方法,建立基于不同工况响应下的车门系统轻量化优化模型,进行优化计算。

1 BESO 拓扑优化方法

拓扑优化以材料分布为优化对象,通过拓扑优化,可以在均匀分布材料的设计空间中找到最佳的分布方案。拓扑优化的研究领域主要分为连续体拓扑优化和离散结构拓扑优化。连续体拓扑优化是把优化空间的材料离散成有限个单元(壳单元或者体单元),然后根据相关算法确定设计空间内单元的去留,从而实现拓扑优化。目前连续体拓扑优化方法主要有均匀化方法^[7]、变密度法^[8]、渐进结构优化法^[9](ESO)以及水平集方法^[10]等。

双向渐进结构优化方法(BESO)是在渐进结构优化方法的基础上发展起来的,它克服了传统 ESO 优化方法单元删除后不能再恢复的缺陷,增加了在材料“高效能”区域周围添加新单元的功能,同时在

一定程度上克服了早期 ESO 方法的棋盘格效应、网格依赖性、易陷入局部最优点等缺陷问题。

BESO 方法的原理如下:从结构中一步一步地删除对结构目标性能低效或无效的材料,同时增加对结构目标性能高效的材料,从而使材料布局趋于优化。Yang 等^[11]运用 BESO 方法对结构的刚度进行优化。优化过程中,每一次循环中被删除或者被增加的单元数量是由两个不相关的参数——材料去除率(RR)和材料保留率(IR)决定的。RR 与 IR 的选取对最后的优化设计结果具有较大的影响,增加了设计的不确定性。Rozvany^[12]的研究表明,早期的 BESO 方法并不能得出最优的设计方案,同时 BESO 的计算效率较低,通常需要较大的迭代次数。

本文采用由 Huang 等^[13]提出的一种新的基于结构刚度优化的 BESO 拓扑优化方法。相对于早期的 BESO 方法,该方法作了如下的改进:①提出基于节点灵敏度的单元过滤器,使得计算所得单元灵敏度具有全局性;②提出基于单元平均历史灵敏度的稳定迭代过程的方法,使得单元的最终灵敏度具有全过程的信息。上述改进措施很好地解决了拓扑优化中的棋盘格效应、网格依赖性和结果难收敛等难题,同时计算效率也有较大幅度的提高。考虑 n 种材料(弹性模量分别为 E_1, E_2, \dots, E_n ; 且 $E_1 > E_2 > \dots > E_n$)的拓扑优化方法的数学模型如下:

$$\left. \begin{array}{l} \min C = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \\ \text{s. t. } V_j^* - \sum_{i=1}^N V_i x_{ij} - \sum_{i=1}^{j-1} V_i^* = 0 \\ x_{ij} = \begin{cases} 1 & E \geqslant E_j \\ x_{\min} & E \leqslant E_{j+1} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \end{array} \right\} \quad (1)$$

式中, C 为柔度; \mathbf{u} 、 \mathbf{K} 分别为位移向量和刚度矩阵; V_j^* 为第 j 种材料的体积; V_i 为第 i 个单元的体积; N 为拓扑优化空间单元总数; x_{ij} 为第 i 个单元采用第 j 种材料的密度值; E 为材料的弹性模量。

单元采用何种材料是通过具体程序计算决定的。 n 种不同材料的 BESO 拓扑优化中单元的初始灵敏度计算方法如下:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{j+1}}{E_j}\right) \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i^{(j)} \mathbf{u}_i & \text{第 } 1 \sim \text{第 } j \text{ 种材料} \\ \frac{1}{2} \frac{x_{\min}^{(p-1)} (E_j - E_{j+1})}{x_{\min}^{(p-1)} E_j + (1 - x_{\min}^{(p)}) E_{j+1}} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i^{(j+1)} \mathbf{u}_i & \text{第 } j+1 \sim \text{第 } n \text{ 种材料} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_{ij} 为对应于第 j 种材料的第 i 个单元的灵敏度数值; \mathbf{u}_i 为第 i 个单元的节点位移向量; $\mathbf{K}_i^{(j)}$ 为在弹性模量为 E_j 时第 i 个单元的刚度矩阵; p 为惩罚因子。

改进型的 BESO 方法中,引进了新的单元过滤器,在使用过滤器之前,要把那些没有加载边界条件的节点的灵敏度计算出来,在这里,单元的灵敏度在进行了有限元分析后经计算获得,由文献 [14] 可知,单一材料与多种材料的拓扑优化中单元的初始灵敏度的计算方法是不一样的,所以必须区别对待。节点灵敏度通过平均其周围的单元的灵敏度得出:

$$\alpha_j^n = \sum_{i=1}^M \omega_i \alpha_i^e \quad (3)$$

式中, α_j^n 为第 j 个节点灵敏度; α_i^e 为第 i 个单元灵敏度; M 为与第 j 个节点连接的单元总数; ω_i 为第 i 个单元对于节

点 j 的权重系数,而且 $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1$ 。

ω_i 的定义如下:

$$\omega_i = \frac{1}{M-1} \left(1 - \frac{1}{\sum_{j=1}^M r_{ij}} \right) \quad (4)$$

其中, r_{ij} 为第 i 个单元中心与第 j 个节点之间的距离,即中心越靠近节点的单元对节点的灵敏度影响越大。

1.1 基于节点灵敏度的单元过滤器

上述计算的节点灵敏度需要转换为单元的灵敏度,为了实现这个目的,须把节点的灵敏度映射到单元上,本节所述的过滤器正好能实现这样的功能。过滤器的作用就是找出图 1 所示的圆圈区域内影响第 i 个单元灵敏度的所有节点,圆的中点即为第 i 个单元的中心。一般来说, r_{min} 要足够大,覆盖区域至少要大于一个单元的大小,这样第 i 个单元的灵敏度的计算方法如下:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^K \omega(r_{ij}) \alpha_j^n}{\sum_{j=1}^K \omega(r_{ij})} \quad (5)$$

$$\omega(r_{ij}) = r_{min} - r_{ij} \quad (6)$$

式中, K 为覆盖区域内节点的总数; $\omega(r_{ij})$ 为权重系数。

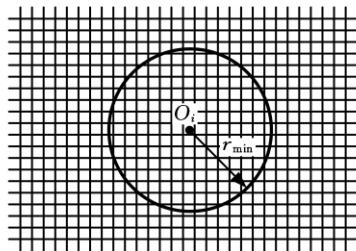


图 1 搜索区域示意图

从上述描述可知,通过单元过滤器处理后,整个设计空间内的单元的灵敏度得到了平顺。某些初始灵敏度很低的单元如所处区域内有大量灵敏度很高的单元,其灵敏度也会相应提高。就是说某些在早期 BESO 方法中被去掉的单元,在改进

型的 BESO 方法中会保留下,它们会分布在高灵敏度单元的附近,从而达到了在材料“高效能”区域周围添加新单元的目的。可以看到,通过这样的方法解决了拓扑优化中棋盘效应和网格依赖两大问题,优化结果会更加趋于合理。

1.2 稳定迭代过程的方法

早期的 BESO 方法中,在迭代过程中,由于单元经常增加或者减少,目标函数与体积分数会出现很大的波动,改进型的 BESO 方法中采用了平均单元历史灵敏度的方法,通过这样的处理能很好地解决目标函数与体积分数波动这个问题。具体的公式如下:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_i^{(k)} + \alpha_i^{(k-1)}}{2} \quad (7)$$

其中, k 为当前循环的数值,在下一个循环中让 $\alpha_i^{(k)} \leftarrow \alpha_i$,这样,经过更新的单元的灵敏数值包括了整个迭代过程中的信息。

2 具体实施策略

2.1 拼焊板设计的 BESO 方法

本文对现有车门内板模型进行拓扑优化,目标是找出材料的最佳分布方式,其中不涉及材料的去除与增加。因此本文在新 BESO 方法的基础上,根据拼焊板零件的特殊要求,在 MATLAB 工作平台中进行编程,利用接口技术调用 Abaqus 求解器对结构进行刚度分析,以获得单元的灵敏度数值。如设计的是由 n 种不同厚度材料组合而成的拼焊板结构,不同厚度的材料对应 BESO 方法中的不同弹性模量材料,且每种材料指定了体积约束,则整个优化过程可以描述如下:由于材料 1 的刚度最大,初始设计空间是充满材料 1 的,然后优化算法不断减少材料 1 的体积,同时增加材料 2 的体积,当材料 1 体积达到指定的约束,本循环结束。下一循环开始减少材料 2 体积,增加材料 3 体积,每一循环类似于一次普通的单一材料拓扑优化过程,除了单元的灵敏度计算方法不一样。如此类推,直到每一种材料的体积都达到设定约束,最后获得这 n 种材料的最佳分布形式。不同材料的交界就是拼焊板零件的焊缝位置,焊缝采用共节点连接进行模拟。程序中需要定义的参数有:第 n 种材料的体积约束 V_n^* ,第 n 种材料的厚度 T_n (由厚到薄),迭代因子递增常数 ER ,过滤器最小半径 r_{min} ,惩罚因子 p 。优化结束后,程序会自动生成新的设计模型和最新有限元分析结果文件,每一循环的流程如图 2 所示。

2.2 多目标拓扑优化数学模型

大多数情况下,多目标优化问题中的各个分目

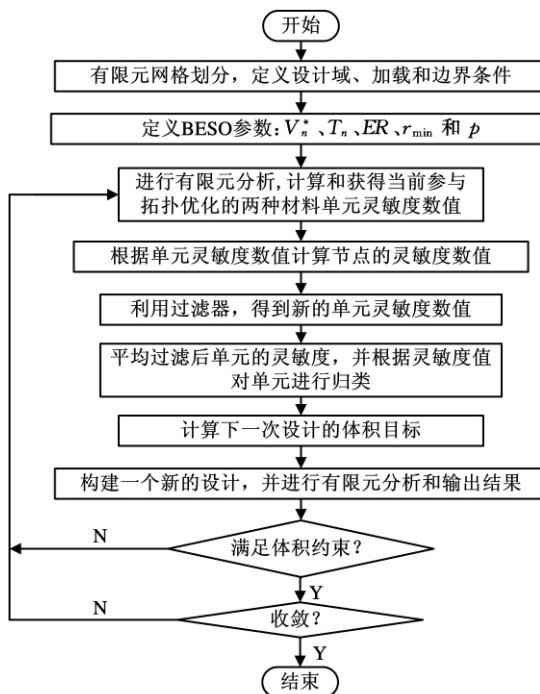


图2 拼焊板设计BESO方法流程图

标是相互冲突的,单个目标的改进可能引起其他目标性能的降低,同时使多个目标均达到最优是不可能的,只能在各个分目标之间进行协调权衡和折中处理,使所有的分目标函数尽可能达到最优。

本文以车门刚度最大化为目标函数,但车门有多种刚度,每种刚度对应一种工况,不同工况下对应有不同刚度最优的拓扑解,多个工况下的刚度拓扑优化问题通常称作多刚度拓扑优化问题^[15]。对此,本文采用线性加权法将多目标问题转化为单目标问题,同时将刚度最大化问题等效为柔度最小问题来研究,于是在考虑体积分数约束的情况下,一般情况下拼焊板车门的多刚度拓扑优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & C = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^m \omega_i C^{(i)} \\ \text{s. t.} \quad & V^* \leq N_{\text{frac}} V_{\text{ref}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, m 为载荷工况总数; $C^{(i)}$ 为第 i 个工况的平均柔度; V^* 为材料保留体积; N_{frac} 为刚度最大材料体积允许百分比; V_{ref} 为设计空间总体积。

参照式(1)和式(8),多刚度BESO拓扑优化的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & C = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i = \sum_{i=1}^m \omega_i C^{(i)} \\ \text{s. t.} \quad & V_j^* - \sum_{i=1}^N V_i x_{ij} - \sum_{i=1}^{j-1} V_i^* = 0 \\ & x_{ij} = \begin{cases} 1 & E \geq E_j \\ x_{\min} & E \leq E_{j+1} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (9)$$

3 算例研究

作为比较,将该算例用 Altia. OptiStruct 得到的拓扑结果与本文方法所得结果进行对比。对一块简单的平板进行多工况拓扑优化,平板大小为 $1\text{m} \times 1\text{m}$,单元类型为四边形单元,单元的大小为 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$,材料为普通钢,弹性模量为 210GPa ,泊松比为 0.3 ,密度为 7800kg/m^3 ,工况描述如图3所示。

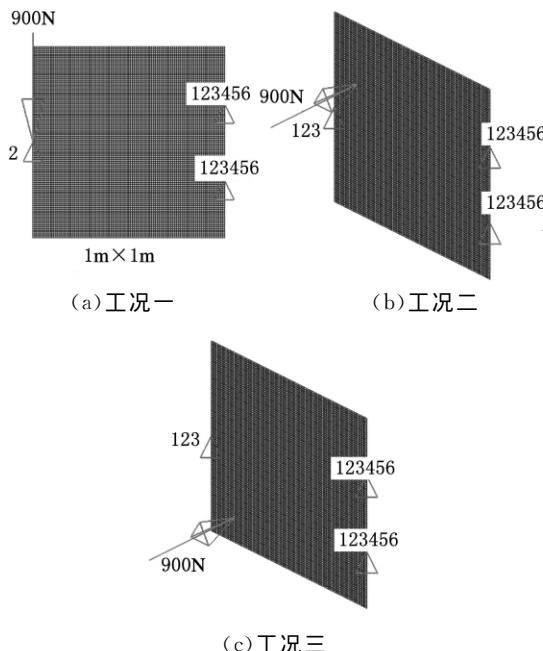


图3 平板拓扑优化工况描述

对平板加载三种工况,目标为综合柔度最小,对于BESO方法,参数 n 取为 2,然后取 T_1 为 1.4mm , T_2 为 0.7mm ; V_1^* 和 V_2^* 分别取总体积的 40% 和 60%。对于 Altia. OptiStruct 中运用的 SIMP 法, N_{frac} 取为 40%,平板的初始厚度为 1.4mm ,拓扑优化最小厚度为 0.7mm 。为了方便讨论,在这里将 3 种工况视为同等重要,取各工况的权值相等,两种方法的拓扑优化结果如图4所示。

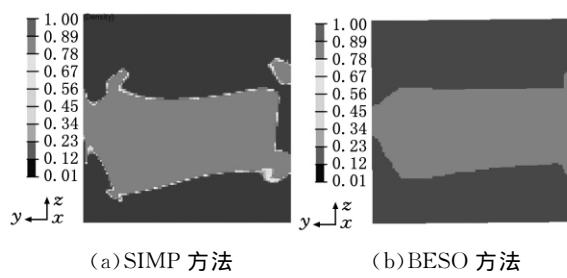


图4 SIMP方法与改进型BESO方法拓扑结果对比

图4的颜色标尺中最上端区域表示 1.4mm 厚的材料,最下端区域表示 0.7mm 厚的材料,其他区域表示 $0.7\sim 1.4\text{mm}$ 厚的材料。可以清楚地看到,相对于 Altia. OptiStruct 中运用的 SIMP

法,改进型 BESO 法得出的结果更合理,材料分布具有聚集性,不存在棋盘效应和中间密度,能较好地指导拼焊板零件焊缝线的准确定位。

4 拼焊板车门系统轻量化研究

本文以国内某车型的带有加强板的车门系统为研究对象,其内板加强板去除情况如图 5 所示,对原始车门系统加载 3 种工况,分别是下垂工况、上扭转工况、下扭转工况,其工况如图 6 所示。车门系统原始质量为 16.51kg,其中车门内板与加强板的总质量为 7.661kg,内板的原始厚度为 0.8mm,带加强板的原始车门系统平均柔度值分别为:下垂工况平均柔度为 $2.427 \times 10^3 \text{ mm} \cdot \text{N}$,上扭转工况的平均柔度为 $6.864 \times 10^2 \text{ mm} \cdot \text{N}$,下扭转工况的平均柔度为 $1.561 \times 10^3 \text{ mm} \cdot \text{N}$ 。材料为普通钢,弹性模量为 210GPa,泊松比为 0.3,密度为 7800 kg/m^3 。

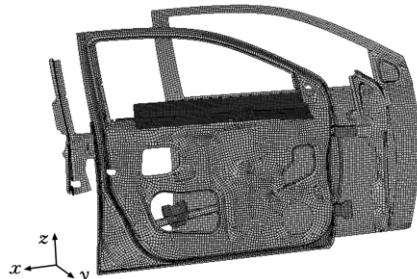
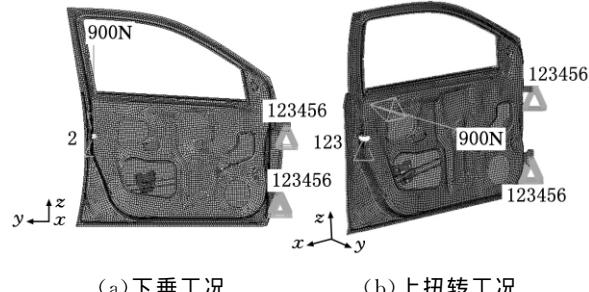


图 5 去除车门内板加强板



(a) 下垂工况 (b) 上扭转工况

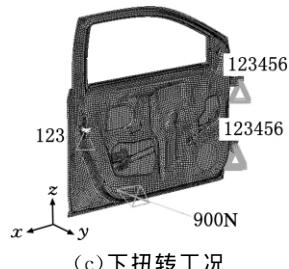


图 6 车门的有限元模型及其工况

4.1 拼焊板车门焊缝布置

以去除加强板的车门系统为有限元分析模型,车门内板为改进型 BESO 优化方法的拓扑空间,根据工程应用经验,车门内板一般是采用两种不同厚度的材料进行拼焊,所以把改进型 BESO

参数 n 取为 2,然后取 T_1 为 1.4mm, T_2 为 0.7mm; V_1^* 分别为总体积的 40%、50%、60%, V_2^* 分别为总体积的 60%、50%、40%;迭代因子递增常数 ER 为 2%,过滤器最小半径 r_{\min} 为 50mm,惩罚因子 p 为 3.0。对应于 SIMP 法,其体积允许百分比 N_{frac} 分别为 40%、50%、60%,惩罚因子 p 取为 3.0,拓扑优化原始厚度设定为 1.4mm,最小拓扑厚度设定为 0.7mm。目标函数是综合柔度最小,优化模型如式(9)所示。

分别运用 SIMP 法与改进型 BESO 法对内板进行拓扑优化,所得的结果如图 7 所示,可见,相比于 SIMP 法,改进型 BESO 法得出来的拓扑结果更加容易解读,能直接指导拼焊板零件设计,并且改进型 BESO 法的迭代过程十分的平顺,其迭代历史如图 8 所示。这样,根据拓扑优化结果,同时考虑到下垂工况对门锁处的位移要求,重新构造车门内板,其拼焊形式如图 9 所示,分成三部分,厚度分别是 T_1 、 T_2 和 T_3 。

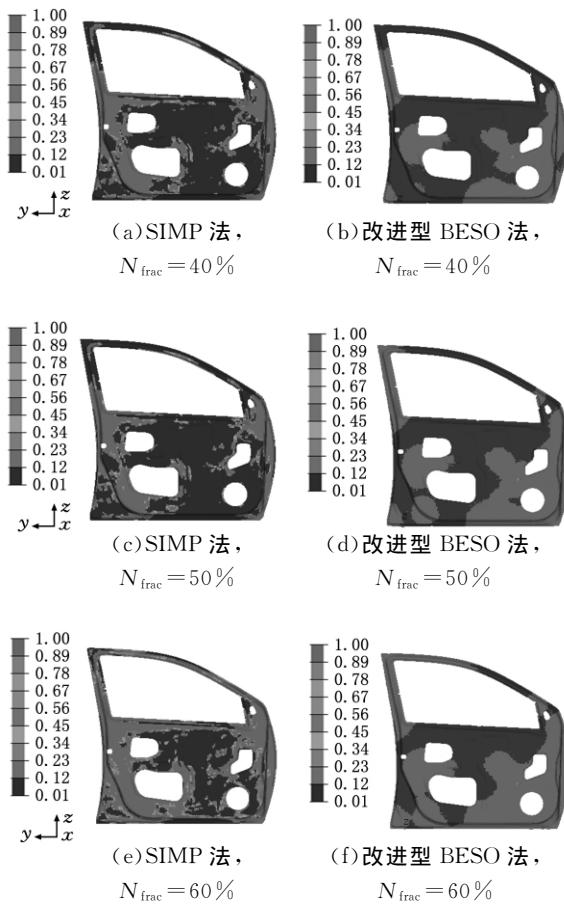


图 7 拓扑优化结果与对比

4.2 车门系统的尺寸优化

尺寸优化是一种细节优化设计方法,它通过改变结构的单元属性(如壳单元厚度、梁单元横截面面积、弹簧单元刚度和质量单元质量等)以达到一

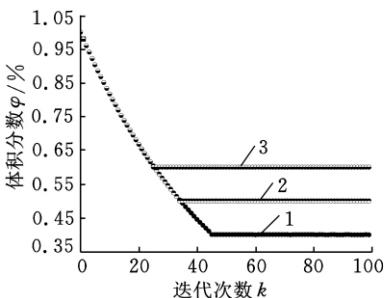
1. $V_1^* = 40\%V_{ref}$ 2. $V_1^* = 50\%V_{ref}$ 3. $V_1^* = 60\%V_{ref}$

图8 体积分数的迭代历史

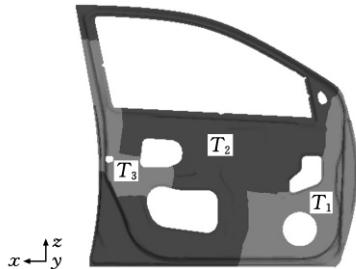


图9 车门内板材料划分

定的设计要求(如应力、质量、位移等)。本文的尺寸优化工作主要利用商业软件 Altia, OptiStruct 中的尺寸优化模块来完成。具体优化过程如下:首先对加载了多种刚度工况的拼焊板车门系统进行全局灵敏性分析后,定义了内板 3 块拼焊板厚度 $T_1 \sim T_3$ 、外板厚度 T_4 、上下铰链厚度 T_5 和 T_6 、上下铰链加强板厚度 T_7 和 T_8 ,共 8 个变量作为尺寸优化的设计变量,各个变量的初始值及范围见表 1,其优化数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min & \quad Weight(T_1, T_2, \dots, T_8) \\ \text{s. t.} & \quad C_j^{\text{TWB}} - C_j^{\text{BASE}} \leqslant 0 \quad j = 1, 2, 3 \\ & \quad T_i^L \leqslant T_i \leqslant T_i^U \quad i = 1, 2, \dots, 8 \\ & \quad T_1 - 2T_2 \leqslant 0 \\ & \quad T_3 - 2T_2 \leqslant 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中, C_j^{TWB} 为车门系统(拼焊板)在第 j 个工况下的柔度; C_j^{BASE} 为车门系统(带加强板)在第 j 个工况下的柔度; T_i^L 为第 i 个部件厚度下限; T_i^U 为第 i 个部件厚度上限。式(7)中最后两个式子的作用是控制拼焊板的板厚比在 2.0 以下,以保证成形性能。

表1 设计变量初始值、取值范围和优化值 mm

变量	初始值	上限	下限	优化值	修正值
T_1	1.40	1.80	0.80	1.03	1.10
T_2	0.70	1.20	0.50	0.81	0.80
T_3	1.40	1.80	0.80	1.45	1.50
T_4	0.80	1.20	0.70	0.70	0.70
T_5	4.00	6.00	2.00	4.53	4.50
T_6	4.00	6.00	2.00	6.00	6.00
T_7	1.20	2.00	1.00	1.00	1.00
T_8	1.60	2.00	1.00	1.00	1.00

对原始拼焊板系统进行尺寸优化,其各设计变量的具体优化结果如表 1 所示,各个变量的迭

代过程如图 10 所示。

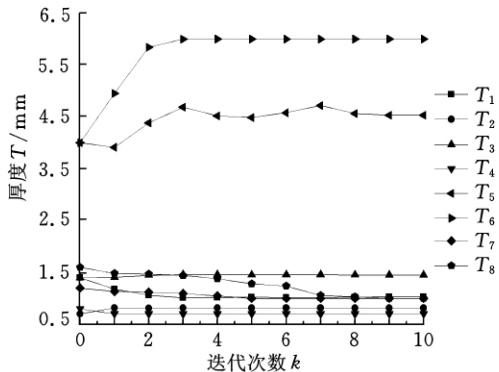
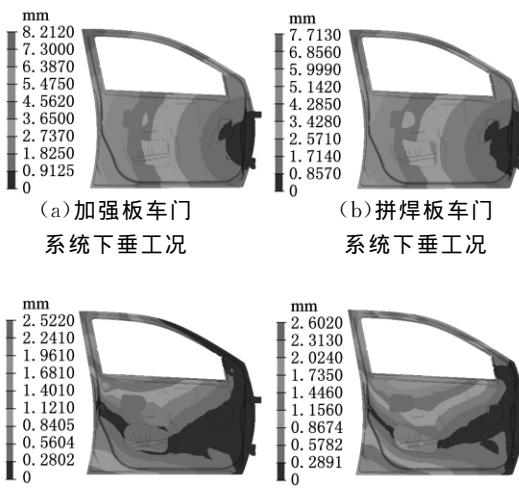


图10 尺寸优化迭代历史

由于优化出来的部件厚度没有与之对应的钢板型号,所以必须对其进行圆整,其修正值如表 1 所示,根据这些优化尺寸值并综合前面所得的拓扑优化结果,对修改后的有限元模型进行重新分析,图 11 所示为优化前后车门系统的变形情况的对比,可知对于下垂工况和下扭转工况其最大位移都有所减小,上扭转工况基本保持不变。拼焊板车门系统各工况平均柔度比带加强板的原始车门系统有所减小,即刚度提高了,而且质量得到了降低。相对于原始模型,车门内板减重 16.1%,整个车门系统减重 12.5%。同时,本文对优化前后车门系统固有模态进行了对比,优化前车门系统的前三阶模态频率分别是 37.29Hz、43.57Hz、



48.85Hz,优化后由于车门的整体质量有较大的降低,模态频率也出现了一些波动,但是在合理的范围之内(车门一阶模态要满足在 30~60Hz 之间),优化后前三阶模态频率分别是 33.27Hz、40.62Hz、43.14Hz。车门系统在整车系统里面有着较大比重,其质量的降低对整车轻量化有着重要的作用,其具体结果如表 2 所示。

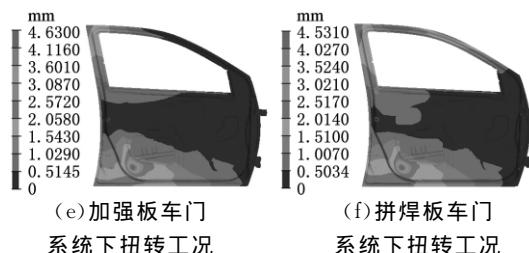


图 11 优化前后车门系统变形情况对比

表 2 优化结果与对比

参数	原始模型	优化模型
车门内板质量(kg)	7.661	6.427
车门系统质量(kg)	16.510	14.450
下垂工况柔度(mm·N)	2427	2248
上扭转工况柔度(mm·N)	686.4	638.5
下扭转工况柔度(mm·N)	1561	1547
内板减重百分比(%)	16.1	
整体减重百分比(%)	12.5	

5 结论

(1) 拼焊板技术应用于车身零件设计能在确保车辆的各种性能的前提下,有效地降低车辆重量,减少车辆油耗。

(2) 改进型 BESO 法能更好地解决拓扑优化中棋盘效应和网格依赖两大问题,而且其材料分布具有聚集性,结果更加适合拼焊板零件特性,能更好指导拼焊板零件设计。

(3) 本文结合多工况拓扑优化方法和尺寸优化方法对车门系统进行轻量化研究,能在综合考虑各工况的要求下,使设计更趋于合理。

参考文献:

- [1] Davis J. The Potential for Weight Reduction Using Magnesium[J]. SAE Paper, 910551, 1991.
- [2] Cho S B. Development of Light Weight Door Considering High Safety[D]. Seoul, Korea: Yonsei University, 1994.
- [3] 朱元右, 姜银方, 杨继昌, 等. 拼焊板冲压成形中的焊缝移动分析[J]. 中国机械工程, 2006, 17(11): 1188-1190.
Zhu Yuanyou, Jiang Yinfang, Yang Jichang, et al. analysis of Weld-line Movement in Tailor-welded Blanks' Formation[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(11): 1188-1190.
- [4] 陈炜, 吴毅明, 吕盾, 等. 差厚激光拼焊板门内板的成形性能研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(15): 1618-1622.
Chen Wei, Wu Yiming, Lv Dun, et al. Research on Formability of Tailor-welded Blanks with Different Thickness in Door Inner Stamping[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(15): 1618-1622.

- [5] Shin J K, Lee K H, Song S I, et al. Automotive Door Design with the ULSAB Concept Using Structural Optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(4): 320-327.
- [6] Song S I, Park G J. Multidisciplinary Optimization of an Automotive Door with a Tailored Blank[J]. Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(2): 151-163.
- [7] Bendsøe M P, Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2): 197-224.
- [8] Bendsøe M P. Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1989, 1(4): 193-202.
- [9] Xie Y M, Steven G P. A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization[J]. Computers & Structures, 1993, 49(5): 885-896.
- [10] Allaire G, Jouve F, Toader A M. A Level-set Method for Shape Optimization[J]. Comptes Rendus Mathematique, 2002, 334(12): 1125-1130.
- [11] Yang X Y, Xie Y M, Steven G P, et al. Bi-directional Evolutionary Method for Stiffness Optimization[J]. AIAA, 1999, 37: 1483-1488.
- [12] Rozvany G I N. A Critical Review of Established Methods of Structural Topology Optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization (S1615-147X), 2007, 34: 123-132.
- [13] Huang X, Xie Y M. Convergent and Mesh-independent Solutions for the Bi-directional Evolutionary Structural Optimization Method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43(14): 1039-1049.
- [14] Huang X, Xie Y M. Bi-directional Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures with One or Multiple Materials [J]. Comput Mech., 2009, 43: 393-401.
- [15] Min S, Nishiaki S, Kikuchi N. Unified Topology Design of Static and Vibrating Structures Using Multiobjective Optimization [J]. Computers and Structures, 2000, 75: 93-116.

(编辑 郭伟)

作者简介:陈刚强,男,1986年生。湖南大学汽车车身先进制造国家重点实验室硕士研究生。主要研究方向为车身结构优化设计与CAE。李光耀(通信作者),男,1963年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室主任、教授、博士研究生导师。孙光永,男,1981年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室博士研究生,汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室研究人员。郭瑞泉,男,1967年生。宝山钢铁股份有限公司研究员级高级工程师。