

基于拓扑优化的拼焊板后背门轻量化设计^{*}

LIGHTWEIGHT DESIGN FOR TAILOR-WELDED BLANK REAR DOOR BASED ON TOPOLOGY OPTIMIZATION

涂 晴** 王丽娟 陈宗渝 陈东民 赵鹏飞

(南昌大学 机电工程学院 南昌 330031)

TU Qing WANG LiJuan CHEN ZongYu CHEN DongMin ZHAO PengFei

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

摘要 将拼焊板技术应用于汽车轻量化设计,提出了基于拓扑优化的拼焊板轻量化设计方法。通过 SIMP (solid isotropic material with penalization) 法拓扑优化确定分块数目以及焊缝线位置。再以板件厚度作为设计变量,利用序列二次规划法进行多目标优化。运用该方法对某 SUV 车型后背门进行了轻量化设计,在保证拼焊板后背门各种刚度和模态性能指标的前提下,达到了轻量化的效果。具有工程实际意义。

关键词 轻量化 拼焊板 SIMP 法拓扑优化 焊缝线 尺寸优化

中图分类号 TP391 U463.8

Abstract The tailor-welded blank technology is applied in automobile lightweight design. A new method is generated, which is based on lightweight design for tailor-welded blank by topology optimization. The number and location of weld lines is by the SIMP (solid isotropic material with penalization) method topology optimization. With the thickness of the components as the design variables, the series quadratic programming (SQP) method is used to do the research about multi-objective optimization. This method is applied in the lightweight design of a SUV's rear door, achieving goal of the lightweight, under the premise of performance of TWB rear door, including the stiffness and modal. The study has significance in engineering project.

Key words Lightweight; Tailor welded blank (TWB); SIMP (solid isotropic material with penalization) method topology optimization; Weld line; Size optimization

Corresponding author: TU Qing, E-mail: 458192529@qq.com

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51165034), and the Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20132BAB206029).

Manuscript received 20131220, in revised form 20140109

引言

汽车的节能、环保已成为汽车工业发展的主题,而这些都离不开汽车轻量化。世界铝业协会的报告表明,汽车的质量每减少 10%,燃油的消耗可以降低 6%~8%^[1]。近年来,拼焊板越来越受到汽车行业的重视,运用拼焊板结构减轻了汽车的质量提高了板材的利用率^[2]。Shin J K 等^[3]利用商业化软件 Genesis,对拼焊板车门内板进行拓扑优化,结果表明车门内板的性能得到改善,质量降低了 8.72%。Song S I 等^[4]利用优化方法对拼焊板车门内板进行优化,研究结果表明使用拼焊板技术的车门内板重量降低了 15%。文献[5]根据原始设计中的加强筋位置来确定拼焊板车门内板的分块数目,研究表明使用拼焊板的车门内板减轻了 11.9%,达到了轻量化的效果。

但是相关的研究对拼焊板的分块以及焊缝位置的确定还不能形成一套有效的方法。一定程度上限制了拼焊板结构在汽车轻量化方面的应用。文献[6]采用双向渐进结构优化方法对车门内板进行拓扑优化,确定了拼焊板分块数目及焊缝位置。然而陈刚强等利用双向渐进结构优化方法得到的拓扑优化结果在收敛性方面有所欠缺以及计算效率不是很高。为了解决上述不足之处,本文将 SIMP 拓扑优化方法和尺寸优化方法结合应用于后背门的轻量化研究中。基于 SIMP 理论的拓扑优化确定了拼焊板分块数目以及焊缝线的位置,在焊缝位置确定后对拼焊板后背门进行灵敏度分析,选取拼焊板母板和灵敏度值较大的构件厚度作为设计变量,采用均匀试验设计方法获取样本数据,利用 HyperStudy 软件进行多目标优化,显著地减小了后背门的质量。

^{*} 20131220 收到初稿,20140109 收到修改稿。国家自然科学基金项目(51165034)、江西省自然科学基金项目(20132BAB206029)资助。

^{**}涂 晴,男,1989 年 8 月生,江西省宜春市人,汉族,南昌大学机电工程学硕士研究生,研究方向为汽车被动安全及车身轻量化。

1 基于 SIMP 法多目标拓扑优化

SIMP 法^[7]是将设计区域内的单元密度作为设计变量,0~1 之间连续取值。SIMP 法是在相对密度法的基础上提出的,在拓扑优化过程中将单元作为设计变量,采用惩罚因子约束抑制介于 0~1 之间的单元,消除了棋盘格现象,提高了数值稳定性^[8],改善了其收敛性及提高了计算效率。在给定的设计区域内找到材料的最优分布,提高材料的利用率,达到轻量化的目的。

1.1 后背门有限元模型建立及工况设置

本文进行拓扑优化不会对材料本身产生增加与删减,目的只是为了得到材料的最佳分布,为拼焊板焊缝的布置提供依据。首先建立某 SUV 后背门的有限元模型,所有板件材料的弹性模量为 2.1×10^5 MPa、泊松比 0.3、密度 7.8×10^{-9} t/mm³。在分析的过程中,应考虑后背门弯曲、扭转两种刚度工况及模态工况。

弯曲刚度工况:约束后背门左右两个铰链 6 个方向的自由度,约束后背门左右两侧支撑杆位置 X 向和 Z 向移动自由度。在后背门右侧缓冲垫支撑点位置施加大小为 50 N 的垂直压力。

扭转刚度工况:约束后背门左右两个铰链的 6 个方向自由度,并约束后背门锁机构位置 Z 向移动自由度。在后背门右侧缓冲垫支撑点位置施加大小为 50 N 的垂直载荷。

1.2 拓扑优化分析

将后背门内板定义为设计变量,内板的体积分数最小作为目标函数,分别以弯曲、扭转刚度以及模态为约束条件。拓扑优化时,对模型施加对称约束使拓扑优化结果具有对称性,利用 OptiStruct 软件进行拓扑优化计算。图 1 为目标函数的迭代过程曲线,从曲线中可以清晰地看出迭代过程较平顺,没有出现振荡现象。图 2 为拓扑优化后的材料分布图。

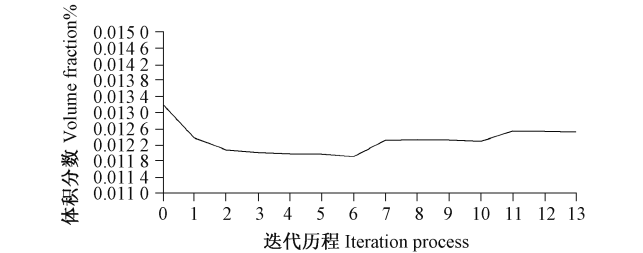


图 1 迭代历程
Fig. 1 Numbers of iteration

1.3 焊缝模型的建立及焊缝布置

拼焊板焊缝模型的建立,有两种方法:一是考虑焊缝的形状以及热影响区,精确建立焊缝的有限元模型;

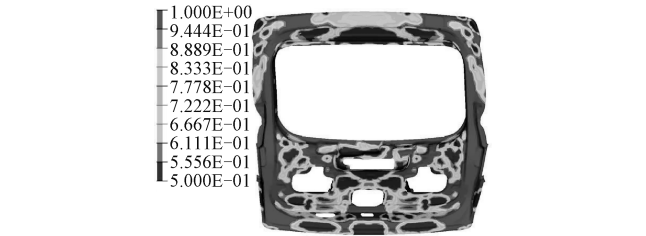


图 2 拓扑优化结果
Fig. 2 Results of the topology optimization

二是不考虑焊缝的类型,只考虑焊缝的位置。焊缝模型主要由三种单元建模分别是梁单元建模、壳单元或实体单元建模以及刚性连接(焊点)建模。由于焊缝尺寸大小一般为 1 mm 左右,而本文的零件尺寸较大,如果对焊缝精确建模,需要对焊缝建立 1 mm×1 mm 的网格,焊缝两侧母材相应的也要建立很小的网格,导致网格质量不合格以及计算不稳定和时间过长。研究表明,若拼焊板的焊接质量合格,焊缝强度要比母板的强,在冲压成形的过程中焊缝基本不会失效,故焊缝对性能的影响不大^[9]。同时文献[10]对拼焊板车门进行了刚度模态分析工作,结果表明焊缝采用共节点连接的仿真分析结果与试验结果吻合度较高。因此通常在结构性能分析中只考虑焊缝的位置,不考虑焊缝的类型,本文将焊缝简化为一个简单的边界,直接将节点合并。

拓扑优化后的材料分布如图 2 所示,根据设计经验一般需要在材料密度较大的部位布置加强件来加强该位置的刚度。本文将拼焊板技术应用于内板设计,综合考虑铰链、尾灯加强板的安装位置以及考虑后背门的制造工艺性和对称性,最终内板的拼焊设计如图 3 所示,分为三个区。

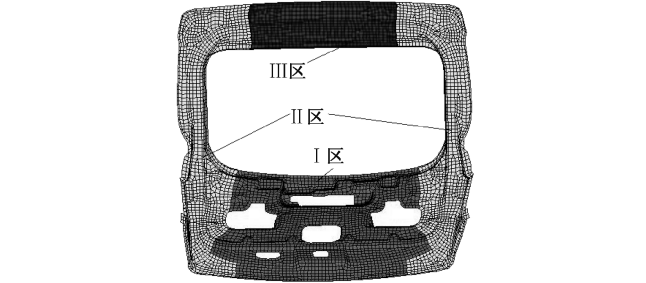


图 3 后背门内板拼焊设计
Fig. 3 The tailor-welded design on the inner blank

2 试验设计

2.1 均匀试验设计方案

本文采用均匀试验设计法对样本点采样,该方法的最大的优点是样本点分布较均匀,可以减少试验次数,每个水平只需要做一次试验即可。

通过有限元分析软件对拼焊板后背门进行灵敏度分析,选择灵敏度值较大的结构件厚度作为设计变量,定义拼焊板内板 I 区的厚度为 T_1 、II 区的厚度 T_3 、III 区的厚度 T_4 以及外板厚度 T_2 。应用均匀设计法,选择 $U_{30}^*(30^{13})$ 均匀设计表进行试验设计,进行 30 次试验。因为本文有 4 个设计变量,根据试验表的使用列表,选择第 1、2、7、8 列进行试验方案^[11]。设计变量的取值: $0.5 \leq T_1 \leq 2.0$; $0.5 \leq T_2 \leq 2.0$; $1.0 \leq T_3 \leq 4.0$; $0.5 \leq T_4 \leq 2.0$,构件的试验设计方案如表 1 所示。

表 1 均匀试验设计方案

Tab. 1 Uniform experiment design

试验号 Experiment number	试验设计变量 Design variables/mm			
	T_1	T_2	T_3	T_4
1	0.500	0.656	2.344	1.384
2	0.552	0.864	3.792	0.708
3	0.604	1.072	2.034	1.644
4	0.656	1.280	3.482	0.968
...	...	...	...	...
28	1.896	1.436	2.965	0.864
29	1.948	1.644	1.206	1.792
30	2.000	1.844	2.654	1.124

2.2 试验设计结果

按照均匀试验设计方案进行仿真试验,将右侧缓冲垫支撑点弯曲刚度工况的位移 L_b 、扭转刚度工况的位移 L_t 和一阶模态 Freq 以及拼焊板后背门的质量 Mass 响应作为约束和目标,试验响应结果如表 2 所示。

表 2 试验响应结果

Tab. 2 The result of the response

试验号 Experiment number	频率 Frequency/ Hz	L_b / mm	L_t / mm	质量 Mass/kg
1	34.454 6	0.2837	0.792 7	19.05
2	37.663 3	0.1541	0.533 8	25.75
3	36.186 2	0.2714	0.638 6	21.61
4	40.328 6	0.1451	0.423 5	28.31
...	...	...	...	...
28	43.018 2	0.1414	0.274 6	31.48
29	34.516 7	0.3223	0.534 1	27.33
30	43.268 6	0.1416	0.258 9	33.98

3 拼焊板后背门多目标优化

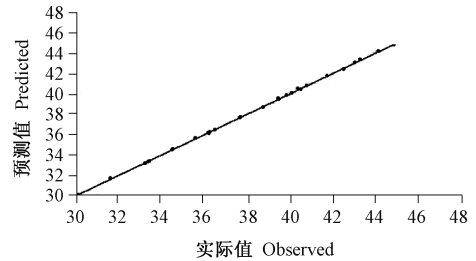
完成试验设计之后,利用移动最小二乘法构建响应面模型,为了检验响应面模型的精度,需要对近似模型进行误差分析,用决定系数 R^2 表示拟合模型的精度,结果如表 3 所示。离散样本与各响应面拟合曲线的分布如图 4 所示。

决定系数 R^2 值越接近 1,说明响应面模型的拟合度越高,从表 3 中可见,4 个近似模型的决定系数都较

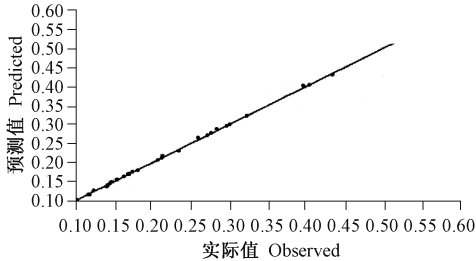
表 3 模型精度

Tab. 3 The accuracy of the modal

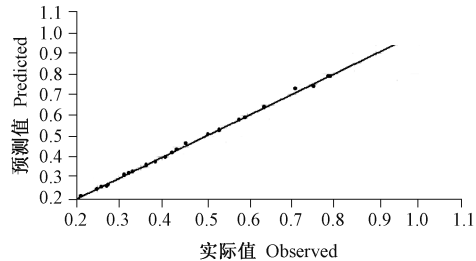
决定系数 Decision coefficient	一阶固有频率 First order natural frequency	弯曲刚度 Bending stiffness	扭转刚度 Torsional stiffness	质量 Mass
R^2	0.999 8	0.999 5	0.999 2	0.999 9



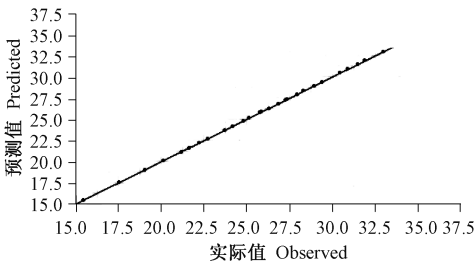
(a) 离散样本与模态响应面的拟合曲线
(a) The curve about the discrete sample and the modal response



(b) 离散样本与弯曲刚度工况响应面的拟合曲线
(b) The curve about the discrete sample and the bending stiffness response



(c) 离散样本与扭转刚度工况响应面的拟合曲线
(c) The curve about the discrete sample and Torsional stiffness response



(d) 离散样本与质量响应面的拟合曲线
(d) The curve about the discrete sample and the mass response

图 4 离散样本与拟合曲线的分布

Fig. 4 The distribution about the discrete sample and the fitting curve

高。同时从离散样本与各响应面拟合曲线的分布图 4 所示,样本点基本通过各响应面拟合曲线。从表 3 和图 4 所示本次响应面模型的拟合度较高,结果是有效的。

在本次轻量化设计中,将弯曲、扭转刚度工况、模态性能和质量进行协同优化,确定优化目标为拼焊板后背门质量,约束弯曲、扭转工况时拼焊板后背门的右侧缓冲垫支撑点的位移变化量以及一阶固有频率。优化方程表达式

$\max$

M

$s. t.$

$L_b \leq 0.64 \text{ mm}$

$L_t \leq 1.16 \text{ mm}$

$F \geq 28.18 \text{ Hz}$

$T_1 \in [0.5, 2.0], T_2 \in [0.5, 2.0]$

$T_3 \in [1.0, 4.0], T_4 \in [0.5, 2.0]$

(1)

式中, M 为拼焊板后背门的整体质量; T_1 为拼焊板内板 I 区的厚度; T_2 为后背门外板的厚度; T_3 为拼焊板内板 II 区的厚度; T_4 为拼焊板内板 III 区的厚度; L_b 为弯曲刚度工况时拼焊板右侧缓冲垫支撑点的位移变化量; L_t 为扭转刚度工况时拼焊板右侧缓冲垫支撑点的位移变化量; F 为后背门一阶固有频率。

根据以上优化目标和约束的设定,在基于序列二次规划法进行多目标求解。经过 11 次迭代寻优后,目标函数趋于稳定。同时考虑到现有钢板的牌号及规格,必须对其优化值进行圆整,各设计变量初始值、优化值及修正值如表 4 所示。

表 4 设计变量初始值、优化值及修正值

Tab. 4 Initial values, optimal value and correction value of the design variables

设计变量 Design variables/mm	初始值 Initial values	优化值 Optimal values	修正值 Correction value
T_1	0.7	0.50	0.50
T_2	0.8	0.50	0.50
T_3	2.3	1.68	1.70
T_4	0.7	0.60	0.60

根据上述尺寸优化的结果并结合拓扑优化结果重新对拼焊板后背门的有限元模型重新进行仿真分析,图 5 为后背门模型优化前后工况情况的对比,具体结果如表 5 所示。

从图 5 和表 5 可知,优化后的拼焊板设计与原始设计相比,弯曲刚度基本保持不变,一阶固有频率增加了,扭转刚度有所下降(仍在允许范围之内),但是质量减小了。相对于原始设计,后背门的整体质量降低了 19.20%,显著的减小了后背门整体的质量。

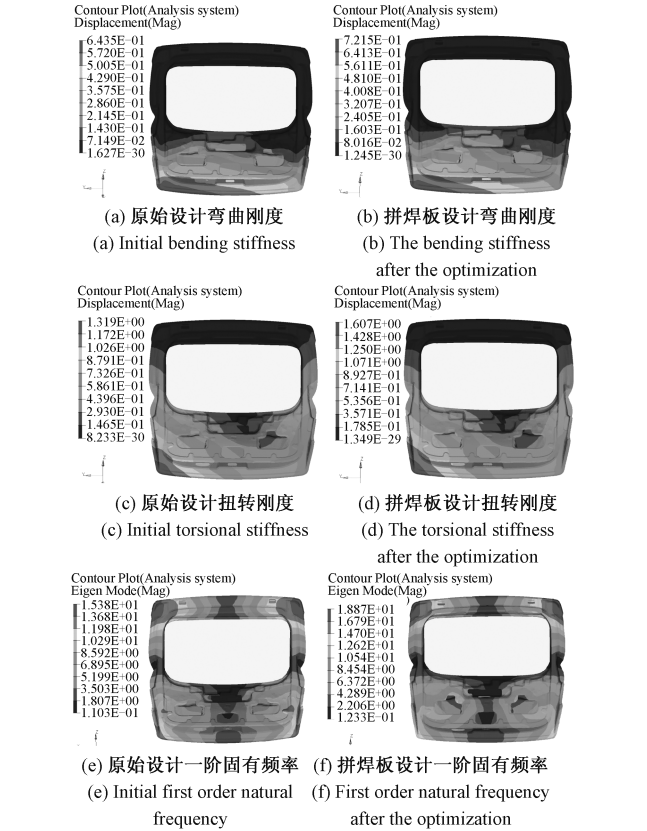


图 5 后背门优化前后工况的对比
Fig. 5 Comparison of the before and after optimization on rear door

表 5 优化结果前后对比

Tab. 5 Results comparison of the before and after optimization

参数 Parameters	原始设计 Initial design	拼焊板设计 Tailor-welded blank design
L_b /mm	0.643	0.645
L_t /mm	1.244	1.463
一阶固有频率 First order natural frequency/Hz	28.18	28.78
背门系统质量 The mass of rear door/kg	16.920	13.67
背门系统减重 Weight lossing/ %	19.20	

4 结论

本文从轻量化的角度考虑,将拼焊板技术应用于后背门轻量化设计中,结合 SIMP 法拓扑优化和尺寸优化对后背门进行轻量化研究,在保证后背门弯曲、扭转刚度和模态性能的前提下,后背门整体质量降低了 19.20%,达到了轻量化的效果,同时减少了工艺工装及提高了板材利用率,验证了该方法的可行性。

参考文献 (References)

[1] 应善强,张义和,曹广祥.汽车轻量化与高强度钢板的应用[J].汽车工艺与材料,2012,10(1):11-23.

- YING ShanQiang, ZHANG YiHe, CAO GuangXiang. The application of the auto lightweight and high strength steel plate[J]. AutomobileTechnology&Material, 2012, 10(1): 11-23 (In Chinese).
- [2] 李 斌, 郭小燕, 路洪洲. 激光拼焊板在汽车制造中的应用及相关工艺研究[J]. 激光杂志, 2012, 33(1): 59-60.
- LI Bin, GUO XiaoYan, LU HongZhou. Research on process and application of Laser Tailor Welded Blanks in automobile manufacturers [J]. Laser Journal, 2012, 33 (1): 59-60 (In Chinese).
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 施欲亮, 朱 平, 林忠钦. 利用拼焊板结构改进车门内板的轻量化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 178-181.
- SHI YuLiang, ZHU Ping, Lin ZhongQin. Lightweight redesign of the automotive inner door panel using tailor-welded blank structure [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2008, 39 (3): 178-181 (In Chinese).
- [6] 陈刚强, 李光耀, 孙光永, 等. 拼焊板车门焊缝布置与尺寸优化设计方法研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(1): 103-109.
- CHEN GangQiang, LI GuangYao, SUN GuangYong, et al. Research on layout of weld lines and size optimization for TWB doors [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24 (1): 103-109 (In Chinese).
- [7] 占金青, 张宪民. 连续体结构的静动态多目标拓扑优化方法研究 [J]. 机械强度, 2010, 32(6): 933-937.
- ZHAN JinQing, ZHANG XianMin. Research on static and dynamic multi-objective topology optimization of continuum structures [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32 (6): 933-937 (In Chinese).
- [8] 左孔天, 陈立平, 王书亭, 等. 用拓扑优化方法进行微型柔性机构的设计研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(21): 1886-1890.
- ZUO KongTian, CHEN LiPing, WANG ShuTing, et al. Research on design of micro-compliant mechanisms with topology optimization method [J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15 (21): 1886-1890 (In Chinese).
- [9] 张立玲, 高 峰, 杜发荣. 不等厚拼焊管轴向压缩变形的数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(4): 6-9.
- ZHANG LiLing, GAO Feng, DU FaRong. Experimental and numerical investigation of axial crushing of dissimilar thickness tailor2welded tubes [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13 (4): 6-9 (In Chinese).
- [10] 余天明. 激光拼焊板制车门成形和刚度的数值仿真与实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011: 69.
- YU TianMing. Numerical simulation and test researehon formingand stiffness for auto doormade of tailor welded blank [D]. Changchun: Jilin University, 2011: 69 (In Chinese).
- [11] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 93.
- FANG KaiTai. Uniform design and uniform design table [M]. Beijing: Science Press, 1994: 93 (In Chinese).