

基于灵敏度分析的白车身轻量化设计

蔺超^{1,2}, 柴保明¹, 许晟杰²

(1. 河北工程大学 机电工程学院, 河北 邯郸 056038; 2 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要:选取某款轿车的白车身为参照,建立白车身有限元模型。以扭转工况为计算基础设置约束条件,选择白车身的重量为目标函数、零部件的板厚为设计变量。利用 Nastran 软件计算出各零部件的灵敏度值。引入绝对灵敏度和平均绝对灵敏度概念对零部件的灵敏度值进行评价。对零部件厚度进行优化减薄处理,并通过迭代计算验证优化方案。最终在保证白车身扭转刚度值变化不超过5%的前提下,实现白车身质量降低3.73%。

关键词:扭转刚度;灵敏度分析;轻量化;有限元

中图分类号:TH12

文献标识码:A

Body in white lightweight design based on sensitivity analysis

LIN Chao^{1,2}, CHAI Bao-ming¹, XU Sheng-jie²

(1. College of the Mechanical and Electric Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 050638, China;

2. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: By choosing a car white body as reference, the white body finite element model is established. Being based on torsion condition set constraints, white body weight was chosen as the objective function of the parts thickness as the design variables. The value of the sensitivity of various parts was calculated by using Nastran. The sensitivity value of the parts was evaluated by introducing a concept of average absolute sensitivity and the absolute sensitivity. The parts thickness thinning processing and validation were optimized by iterative calculation optimization solution. Finally the quality white body reduced at 3.73% under the premise of no more than 5% .

Key words: torsion rigidity; sensitivity analysis; lightweight; finite element

实验研究证明汽车自重每减轻10%,每公里燃油消耗可降低5%~7%,汽车尾气排放量降低4%~5%^[1]。白车身是汽车四大组成部分之一,其质量占到车辆总质量的50%左右,因此减轻白车身自重意义重大^[2]。

灵敏度分析是白车身轻量化设计常用的方法之一^[3-4]。然而传统的灵敏度分析中只对白车身的某一部分零件进行分析,根据得到的灵敏度值直接对零件进行尺寸优化^[5-6]。本文不仅对白车身所有零部件进行了灵敏度分析,同时还引入了绝对灵敏度和平均绝对灵敏度概念作为零部件灵敏度值的评价标准。找出评价结果中绝对灵敏度值小于平均绝对灵敏度值的零部件,对这些部件进行尺寸优化,从而达到白车身轻量化目的。

1 灵敏度结构分析理论

1.1 灵敏度分析理论

灵敏度分析实际上就是计算某一响应对设计变量的偏导数^[7]。

$$u = \frac{\partial r_j}{\partial x_i} |_{x_0} \quad (1)$$

式中 r_j - 第 j 个响应, ($j = 1, 2, 3 \dots$); x_i - 第 i 个设计变量, ($i = 1, 2, 3 \dots$) x_0 - 每个设计变量的初始值。

由此公式可以逐步对白车身进行迭代,进而得到最优解。

对于白车身的结构灵敏度分析分为结构静态

灵敏度分析和结构动态灵敏度分析^[5-6]。鉴于本研究选取白车身的扭转刚度作为计算基础,因此不涉及动态灵敏度分析。白车身结构静力学平衡方程如下:

$$F = K\delta \quad (2)$$

式中 F - 施加的静态载荷, N ; K - 白车的总体刚度矩阵; δ - 对应点位移矢量。

将式(2)对设计变量 X (各零部件的厚度) 求偏导, 得

$$0 = \delta \frac{\partial K}{\partial X} + K \frac{\partial \delta}{\partial X} \quad (3)$$

$$\text{即: } \frac{\partial \delta}{\partial X} = -K^{-1} \delta \frac{\partial K}{\partial X} \quad (4)$$

利用式(4)可求得位移对设计变量的 X 的灵敏度。

1.2 灵敏度评价

传统灵敏度分析中对零部件灵敏度值的大小缺少评价标准。本文提出绝对灵敏度和平均绝对灵敏度概念作为灵敏度的评价标准。绝对灵敏度: 减少某个车身零部件厚度使其白车身总质量减少 1%, 对白车身性能改变的百分比的绝对值。

$$\lambda_r^j = \left| \frac{M_0/100 \times (\lambda_m^j \times \lambda_{jp})}{P_0} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中 λ_r^j - 第 j 个零件的相对灵敏度值; M_0 - 白车身的原有总重量, kg ; λ_m^j - 第 j 个零件的质量灵敏度; λ_{jp}^j - 第 j 个零件的扭转刚度灵敏度; P_0 - 白车身初始的性能参数; (初始扭转工况条件下的点位移)。

平均绝对灵敏度: 减少每个白车身的零部件厚度 1%, 对白车身性能改变的百分比的绝对值。

$$\lambda_a = \left| \frac{\sum_{i=1}^n 0.01 d_i \times \lambda_p^i}{P_0} \right| \times 100\% \quad (6)$$

式中 λ_a - 白车身平均绝对灵敏度; d_i - 第 i 个零部件的初始厚度。

灵敏度法进行轻量化设计就是找到对白车身性能影响较小的零部件, 对其进行尺寸优化。判定标准如下:

表 1 灵敏度值判定标准

Tab. 1 Decision criteria of sensitivity values

判定条件	判定结果
$\lambda_r^j \leq \lambda_a$	低灵敏度部件
$\lambda_r^j > \lambda_a$	高灵敏度部件

表 1 中低灵敏度部件即为对车身性能影响较小的零部件, 针对这些部件的板厚进行减薄优化

处理, 实现白车身轻量化。

2 白车身有限元分析计算

2.1 建立白车身的有限元模型

利用 CATIA 软件建立了白车身的三维模型, 将三维模型导入 Hypermesh 软件中进行有限分析的前处理。模型采用 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的网格进行划分, 网格类型为四面体单元 (CTETRA) 和三角形单元 (CTRIA3)。本模型经过计算共有三角形单元 17 599 个, 四面体单元 327 166 个。白车身有限元模型如图 1 所示。车身部件的材料属性是普通碳钢, 密度为 $7.85 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$, 泊松比为 0.3, 弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。



图 1 白车身有限元模型

Fig. 1 White body finite element model

2.2 建立扭转工况

扭转刚度性能主要用来评价汽车在不平路面行驶时承受复杂的扭转载荷下的抗变形能力。因此扭转刚度值是车身设计的一个重要的性能参数。扭转刚度计算公式:

$$S = \frac{M}{\theta} \quad (7)$$

式中 S - 白车身扭转刚度, $N \cdot m/^\circ$; M - 白车身的扭矩, $N \cdot m$; θ - 扭转角。

扭转角为前悬支座与对应左右大梁的相对扭转角, 如图 2 所示。

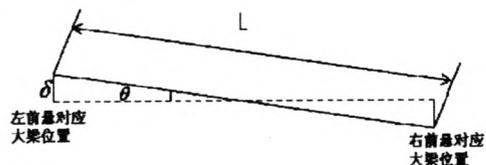


图 2 相对转角

Fig. 2 Relative torsion Angle

根据图 2 求解相对扭转角:

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \arcsin\left(\frac{\delta}{0.5L}\right) \approx 11.465 \times \frac{\delta}{0.5L} \quad (8)$$

式中 L - 前悬横向间距, mm ; δ - 左右前悬与对应

大梁的Z向位移,mm,沿z向在左右前悬位置施加一对大小为2 000 N,方向相反的静态载荷。约束前保险杠中点和左右后悬支座的1,2,3方向。由以上公式和约束条件建立的白车身扭转工况有限元模型如图3所示。

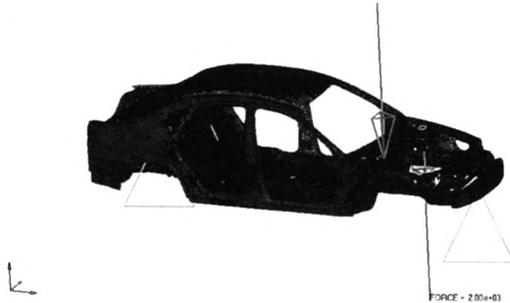


图3 白车身扭转工况有限元模型

Fig.3 The finite element model of white body torsion condition

将白车身扭转工况有限元模型导入到Nastran软件中计算白车身初始状态z向位移应变,如图4所示。

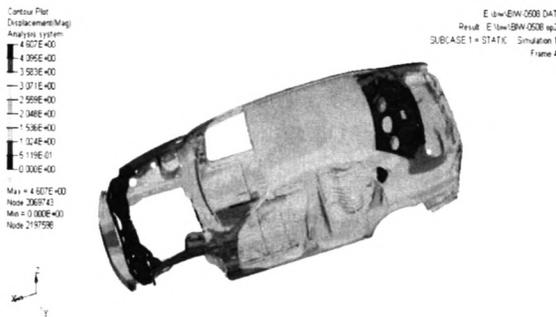


图4 白车身初始状态z向位移应变云图

Fig.4 The displacement and strain contours along z direction in the initial state of the white body

白车身的前悬横向距离为960 mm。扭矩等于加载的静态载荷乘以前悬横向间距的1/2。其静态加载力为2 000 N。故其扭矩为960N·m。初始状态前悬Z向最大位移为3.089 mm。由式(8)可求出相对转角为0.073 8°。则初始状态下的白车身扭转刚度为13 004 N·m/°。

2.3 灵敏度优化

进行灵敏度优化需要确定:优化的目标函数,设计变量和约束条件。由于本文的目的是减轻白车身的自重,故选择白车身的质量最小为目标函数。选择白车身的93个大钣金件和59个小钣金件的厚度为设计变量,共152个设计变量。保证扭转刚度值下降不超5%,并且部件厚度变化不得超过初始厚度的20%,为其优化的约束条件。利

用Nastran软件计算152个零部件的绝对灵敏度和白车身的平均绝对灵敏度。计算得到整车的平均绝对灵敏度为1.71%。所有的零部件中共有5个零部件的绝对灵敏度值小于1.71%(表1)。对这5个钣金件进行尺寸优化。

表2 白车身灵敏度优化方案

Tab.2 Optimization solution of white body sensitivity

名称	绝对灵敏度值	初始厚度 /mm	优化后厚度 /mm
车顶	1.58%	0.80	0.64
防火墙	1.49%	0.75	0.63
前地板后横梁	1.38%	1.40	1.20
B柱内板	1.35%	1.15	0.95
后地板	1.29%	1.20	0.96

根据此优化方案修改白车的有限元模型,将修改后的有限元模型进行迭代计算。经过27次迭代计算白车身的质量,前悬相对大梁的z向位移和扭转刚度值都已收敛,收敛趋势见图5~图7:

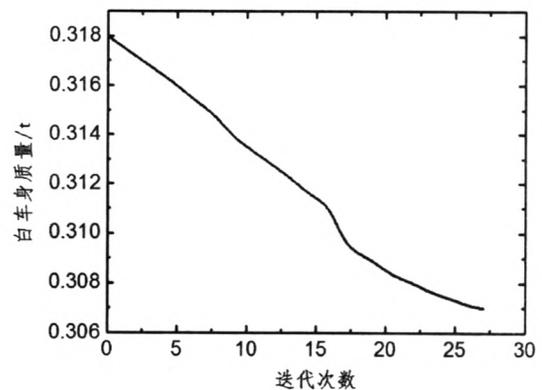


图5 车身自重与迭代次数关系曲线图

Fig.5 Iterations relation graph of body weight and the number

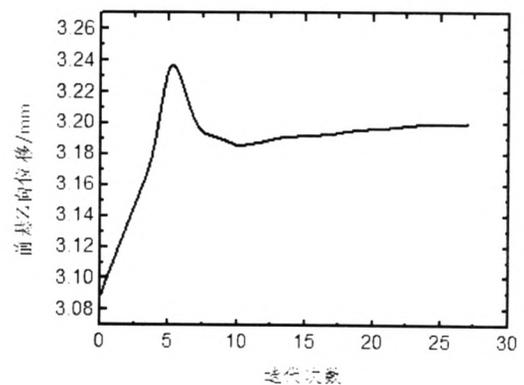


图6 前悬相对大梁的z向位移与迭代次数关系曲线图

Fig.6 Iterations relation graph between displacement of front Suspension relatively girder along z direction and iterations number

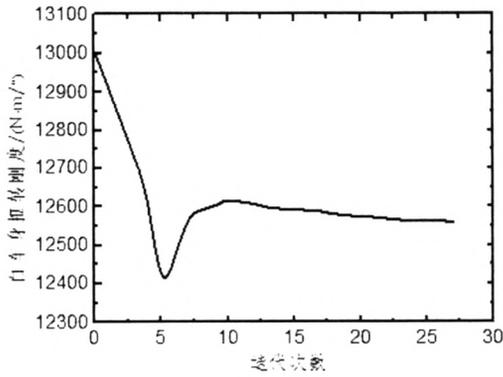


图7 扭转刚度值与迭代次数关系曲线图

Fig.7 Iterations relation graph between torsional rigidity value and iterations number

观察图6与图7发现曲线无明显的突刺,由式(7)和式(8)可知前悬相对大梁的z向位移与白车身的扭转刚度成反比关系。图6与图7符合这一规律。通过图5可以观察到白车身的自重已平稳的收敛于某一常量。优化后的白车身z向应变云图如图8所示。

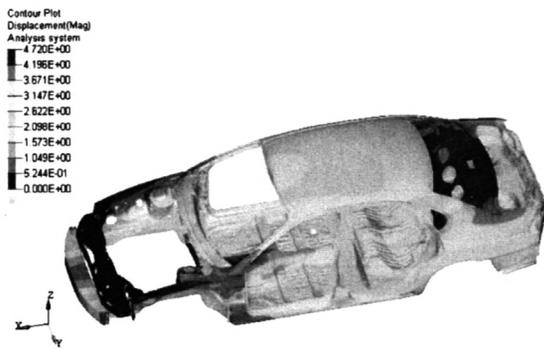


图8 优化后白车身Z向应变云图

Fig.8 The strain nephogram along Z direction of optimized white body

优化前后白车身性能参数改变量如表3所示。

优化前后白车的质量下降3.73%,扭转刚度值下降3.41%小于约束条件的5%。综上所述优化方案有效,迭代结果计算正确。

表3 优化前后性能参数对比

Tab.3 Comparison of performance parameters before and after being optimized

性能参数	优化前	优化后	变化量	变化百分比
白车身重量 /kg	318	307	11	-3.73%
扭转刚度 /(N·m/°)	13 004	12 559.97	444.03	-3.41%

3 结论

通过计算绝对灵敏度和平均绝对灵敏度,能够有效的对白车身所有零部件的灵敏度做出评价,从中选出绝对灵敏度小于平均绝对灵敏度的零部件进行优化设计,实现了在整车条件下对白车身的轻量化设计。为进一步工程实践做出了理论指导。

参考文献:

- [1] 仇彬. 轿车白车身扭转刚度分析及结构优化设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [2] 段月磊, 毕传兴. 基于刚度和模态灵敏度分析的轿车车身轻量化研究[J]. 噪声与振动控制, 2010(6): 79-82.
- [3] BENEDYK J. Light metal in automotive applications[J]. Light Metal Age, 2000, 58(10): 34-35.
- [4] 高云凯, 杨欣, 金哲峰. 轿车车身刚度优化方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005(8): 1095-1097.
- [5] 李亦文, 徐涛, 左文杰. 基于相对灵敏度的车身结构模型修改[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009(6): 1435-1440.
- [6] 唐志坚. 白车身静动态性能灵敏度分析及优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [7] 陈国定, 武力. 轿车白车身结构的相对灵敏度分析[J]. 机械设计, 2007(4): 22-24.

(责任编辑 马立)