

# Structure Optimization Design of Spot Car's Body Based on HyperStudy

Shuai Wang, Chang Sun, Yaqin Feng, Jian Wang

Traffic & Transportation School, Dalian Jiaotong University, Dalian Liaoning  
Email: 236155867@qq.com

Received: Apr. 16<sup>th</sup>, 2017; accepted: Apr. 27<sup>th</sup>, 2017; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Hypermesh and Ansys are combined by HyperStudy perfectly, which are most frequently used CAE simulation software in the engineering field so far. HyperStudy can quickly optimize and improve new rail cars, and greatly shorten the time to produce new rail cars. The internal optimization method can meet the needs of the current optimization analysis. The optimized results can be used to find the optimal solution quickly, and use the best way to complete the production of the vehicle.

## Keywords

HyperStudy, ANSYS, Spot Car, Optimization Design

---

# 基于HyperStudy的点焊车车体结构优化设计

王 帅, 孙 畅, 奉雅琴, 王 剑

大连交通大学交通运输工程学院, 辽宁 大连  
Email: 236155867@qq.com

收稿日期: 2017年4月16日; 录用日期: 2017年4月27日; 发布日期: 2017年4月30日

---

## 摘 要

HyperStudy把目前使用最多的CAE仿真软件, HyperMesh及ANSYS完美的结合到了一起。运用HyperStudy能够快速的对出产的新车局部问题进行优化改进, 大大缩短了出产新车的时间。内部自带的优化方法能满足目前各种优化分析的需要, 用其优化的结果能快速的找到优化最优解, 并以最优的方式

完成整车的制造。

## 关键词

HyperStudy, ANSYS, 点焊车, 优化设计

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现代轨道车辆中应用最多的焊接方式有对接焊、搭接焊、点焊等。点焊结构具有质量轻、静强度高、可靠性好和易于实现自动化等优点[1], 被中车各生产厂所接受。对点焊车车体的安全校核, 基于有限元方法进行仿真分析, 是广泛采用的一种方法。张军等[2]构建出较好的车辆优化数学模型并验证了其可行性; 陈勇敢等[3]对车体焊点布置方法及优化软件进行了对比, 指出了 OptiStruct 和 ANSYS 对焊点布局优化的利弊, 并运用这两款软件对应用模态分析对焊点进行了布局优化。谢素明等[4]解释了结构稳定性的算法原理, 并运用 OptiStruct 软件对不锈钢点焊车车体局部运用子结构技术进行了稳定性分析, 并通过优化手段解决了某点焊车车体的失稳问题, 同时提出可用变密度法来进行焊点的布局优化。潘迪夫等[5]在论文中提出可运用多目标遗传算法对机车部件进行优化。

目前的优化软件较多, HyperStudy 可调用各种分析软件进行形状和尺寸优化, 吴洪亮[6]运用, HyperStudy 与 OptiStruct 结合对汽车车体进行了尺寸优化, 刘磊[7]对航天器结构做了优化, 而焦柯[8]的论文中, 表明修改某单元内部参数就可以完成尺寸优化, 厂内目前的分析软件主要以 ANSYS 为主, 若直接用 HyperStudy 与 ANSYS 连接, 能大大提高车体研发效率。通过以上论文的启发, 焊点在 ANSYS 中也是以网格形式模拟, 若直接修改网格参数, 运用 HyperStudy 的内部优化方法, 不断修改网格参数, 得到满足优化中目标函数的数据, 从而完成对焊点布局的优化操作。本文工作基于 HyperStudy 优化平台, 结合 HyperMesh 建模和 ANSYS 分析功能, 对新型不锈钢点焊车车体进行分析与优化, 包括补强板设计位置、厚度等, 局部结构的优化设计能在节省材料的同时大大降低应力值。

## 2. 车体有限元模型

新型不锈钢点焊车车体钢结构整体由底架、侧墙、车顶、端墙等组成。车体整体外裹不同厚度蒙皮, 内为不同尺寸 Z 型钢焊接而成的骨架。内外部由焊点连接。车体受力后, 力通过各焊点遍布整个车体。车体端部底架及枕梁大部分用 09CuPCrNi 不锈钢, 其余部分采用 SUS301L 系列不锈钢, 其力学性能如表 1 所示。

HyperMesh 是一个高质量高效率的有限元前处理软件, 它提供了高度交互的可视化环境帮助用户建立产品的有限元模型。HyperMesh 高质量高效率的网络划分技术可以完成全面的杆梁、板壳、四面体和六面体网格的自动和半自动划分, 大大简化对复杂几何进行仿真建模的过程[9]。基于 HyperMesh 软件对上述车体进行有限元建模, 有限元模型主要以四节点壳单元(ANSYS SHELL181)为主, 车体焊点由两点梁单元(ANSYS BEAM188)模拟, 设备质量由质量单元(ANSYS MASS21)模拟, 连接关系由柔性元(RBE3)和刚性元(CERIG)模拟。车体单元总数为 1,745,762 个, 其中梁单元总数为 37,612 个, 节点总数为 1710453

个。车体有限元模型分别如图 1 所示，梁单元分布情况如图 2 所示。

### 3. 计算结果及分析

#### 3.1. 整车应力分析

车体静强度分析包括垂向、纵向、扭转等 14 个工况，其中最为恶劣的是整备状态车钩 1500 KN 压缩

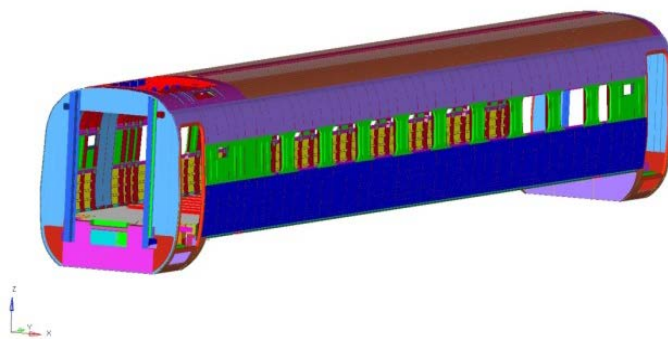
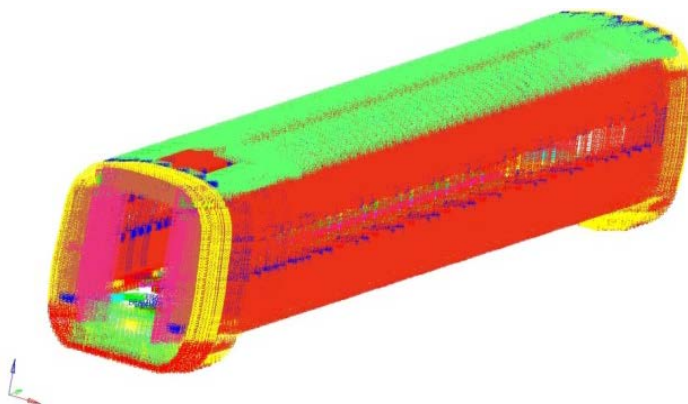
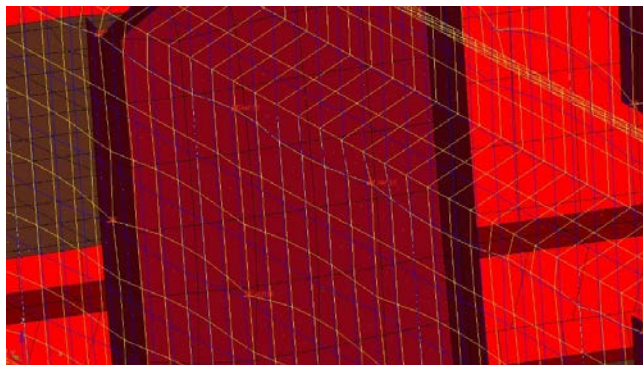


Figure 1. Geometric model of vehicle  
图 1. 车体几何模型



(a)



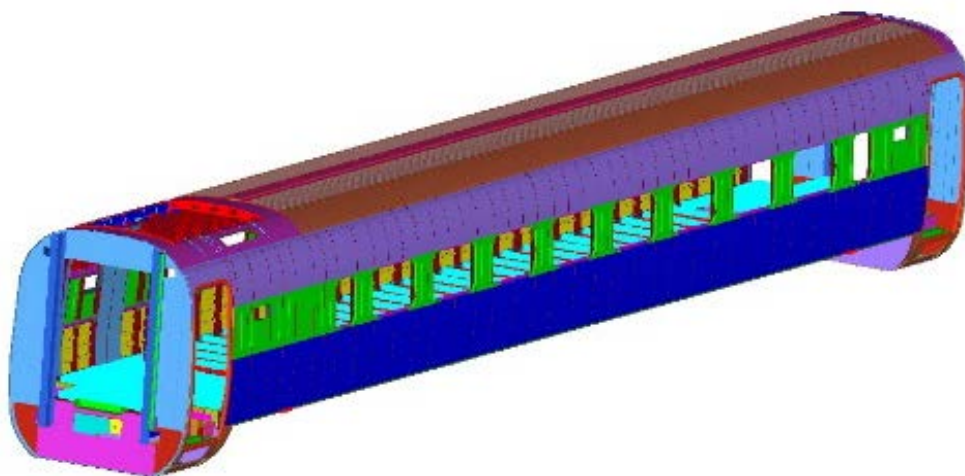
(b)

Figure 2. Distribution of solder joints. (a) Overall distribution of solder joints; (b) Local distribution map of solder joints

图 2. 焊点分布图。(a) 焊点整体分布图；(b) 焊点局部分布图

**Table 1.** Mechanical Properties of stainless steel high speed EMUs**表 1.** 不锈钢高速动车组车体材料力学性能表

材料名称	密度 kg/m <sup>3</sup>	弹性模量 MPa	泊松比	屈服极限 MPa
09CuPCrNi-A	7.297	210,000	0.3	345
SUS301L-DLT	7.297	183,000	0.3	345
SUS301L-ST	7.297	183,000	0.3	410
SUS301L-MT	7.297	183,000	0.3	480
SUS301L-HT	7.297	183,000	0.3	685

**Figure 3.** The preparation conditions of 1500 KN get off the hook compression working load diagram**图 3.** 整备状态下车钩处 1500 KN 压缩工况加载示意图

工况。对纵截面进行横向位移约束及纵向垂向扭转约束，为模拟真是实验状态，左右车钩处各施加 750 KN 的纵向压力，车体地板梁处施加 151 KN 的垂向力，施加状况如图 3 所示。

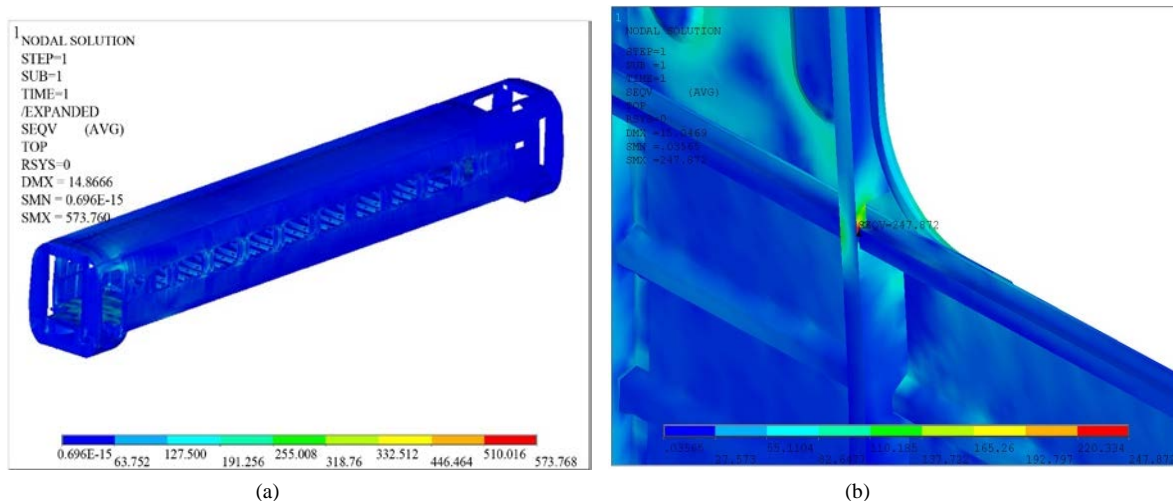
提取压缩工况计算结果，车体各窗角附近应力值均在 200 MPa 以上，最大窗角处应力值到达 247 MPa，具体位置如图 4 所示。

### 3.2. 修改窗角设计

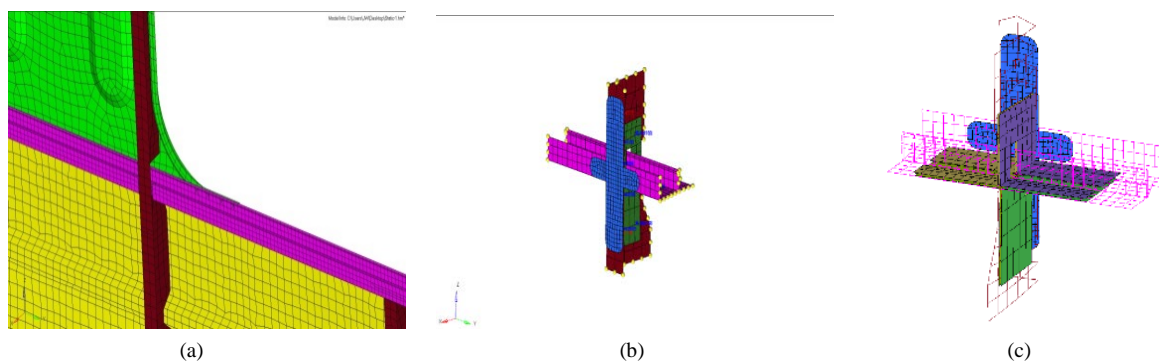
窗角处计算应力值达到较大值 247 MPa，超出屈服强度，需要对窗角结构进行修改设计，以优化结构降低应力。为计算方便计算，修改设计过程中采用子模型技术，把窗角处分离出来，引入总体结构中边界条件，对子模型单独进行优化计算。修改设计选定在窗角四周均加入 2 mm 厚 L 型补强板，同时在横梁和立柱交叉处焊接 2 mm 厚十字立板，如图 5 所示，此时应力值下降到 202 MPa。

## 4. 基于 HyperStudy 的结构优化

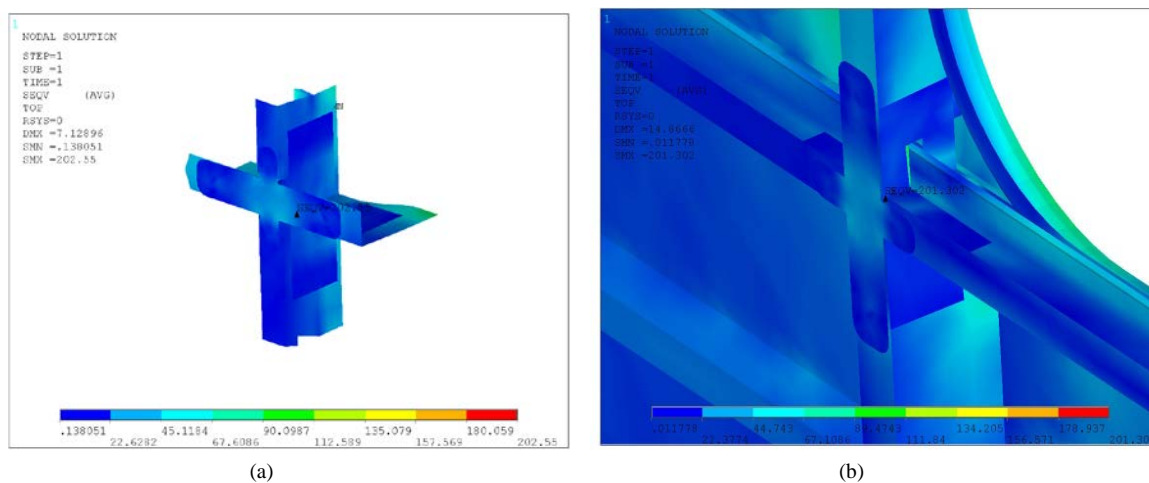
图 6 是两图对比，说明这块区域应力在整车上，和分离出来应力最大值差不多，所以可用子模型结构来替换整车结构，进行计算分析。虽然增加补强板后，应力值下降到了厂里要求的水平，但从板厚的选择，焊点的布置并不是最优解，在此处可利用 HyperStudy 平台，对子模型中的 5 块补强板及与之关联的 34 个焊点进行优化，优化方法选用序列二次规划法(SQP 法)及遗传算法(GA 法)，对编程后的 cdb 文件，运用 ANSYS11.0 版本求解器优化后使分布达到最优解。补强板结构优化设计过程如图 7 所示。



**Figure 4.** The preparation conditions of 1500 KN coupler compression condition stress nephogram. (a) Overall stress nephogram of car body; (b) Local stress nephogram of car body  
**图 4.** 整备状态车钩 1500 KN 压缩工况应力云图。(a) 车体整体应力云图；(b) 车体局部应力云图



**Figure 5.** Model of window angle reinforcement. (a) Original structure of window corner; (b) Plus cross plate structure; (c) Reinforced plate structure  
**图 5.** 窗角补强方案模型。(a) 窗角处原结构；(b) 加十字板结构；(c) 加强板结构



**Figure 6.** Modified stress nephogram. (a) Sub model stress nephogram; (b) The whole vehicle local stress nephogram  
**图 6.** 修改结构后应力云图。(a) 子模型应力云图；(b) 整车局部应力云图

### 4.1. 优化方法介绍[10]

#### 4.1.1. 序列二次规划法(SQP 法)介绍

序列二次规划法(SQP 法)是一种用于求解有约束问题的优化方法。其基本思想是在原有模型的基础上构建一个拉格朗日二阶近似模型，并通过求解该近似模型已确定搜索方向:

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + as$$

在搜索过程中，设计约束被线性化，得:

$$\min \tilde{f}(s) = f\left(x^{(k)} + \nabla_x^T f s + \frac{1}{2} s^T C_{(k)} s\right)$$

$$\tilde{g}_i(s) = g_i\left(x^{(k)}\right) + \nabla_x^T g_j s \leq 0$$

求解此类二次问题即得优化目标。搜索方向的确定服从以下基本原则：从当前设计点出发，通过搜索得到的新的设计点需要使目标函数的取值更优，且满足约束条件。

#### 4.1.2. 遗传算法(GA 法)介绍

遗传算法是以进化理论为依托的一类机器学习技术。其实一种群体进化技术，个体通常用二进制来进行编码。在进行适应度(Fitness)计算时，需对个体进行解码。适应度是评价某个解优劣性的指标。按照达尔文的适者生存进化理论，具有高实用度的个体更有可能被选择(Selection)来繁殖下一代。

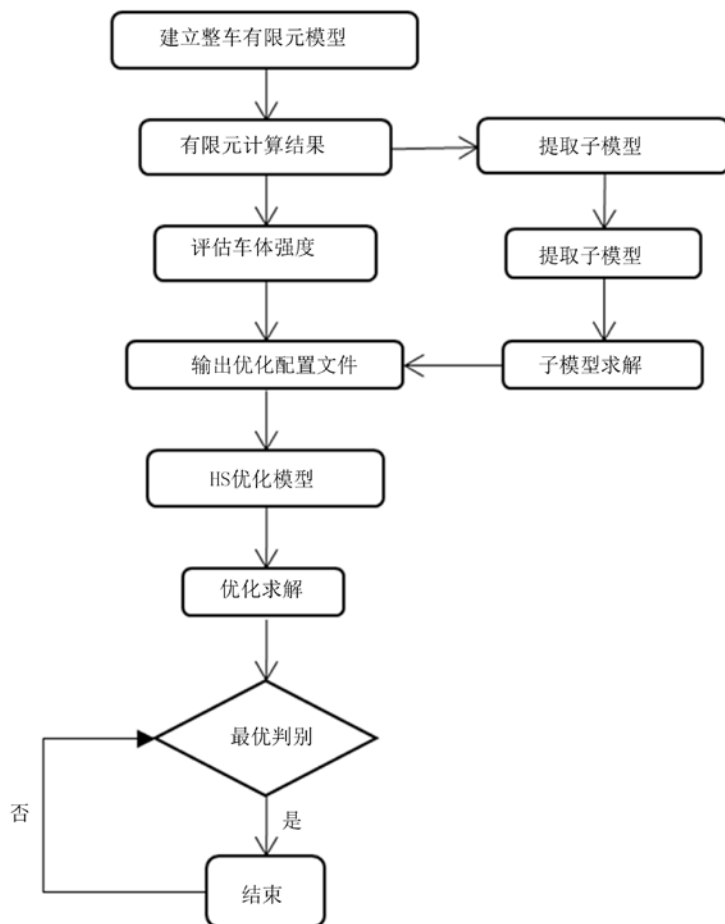


Figure 7. The flow chart of the optimization of the body reinforcing plate  
图 7. 车体补强板处优化的流程图

基于所选个体,通过遗传操作算子将繁殖(Reproduction)下一代。一个个体与所选的另一个个体按照一定概率进行交叉(Cross over)和变异(Mutation)。所产生的个体成为下一代的候选解。这一过程将被重复许多代以使种群不断进化,从而获得优化问题的解。

## 4.2. 焊点布局优化(SQP 法)

### 4.2.1. 仅对 beam 梁拓扑优化

在优化求解器中选择 SQP 方法,设计变量:单独设置 34 个 beam 梁材料的弹性模量值为 183,000 MPa,下限为 1 MPa,上限为 183,000 MPa;设置约束条件:子模型所有节点最大应力值小于等于 180 MPa;设置目标函数:弹性模量总和最小。设置好后执行优化,优化结果如图 8 所示。根据要求,去掉小于 1000 MPa 弹性模量的 beam 梁 4 个,beam 梁优化后形状改变图如图 9,应力云图如图 10,在 bottom 面,最大值为 193.107 MPa。

### 4.2.2. 对结构尺寸优化

再对 5 个补强板进行优化,同理在优化求解器中选择 SQP 方法,设计变量:单独设置 5 块板厚度值为 4mm,下限为 1.5 mm,上限为 4 mm;设置约束条件:子模型所有节点最大应力值小于等于 180 MPa;设置目标函数:应力值最低。设置好后执行优化,优化结果如图 11 所示,最大应力值降低到 184.6 MPa,

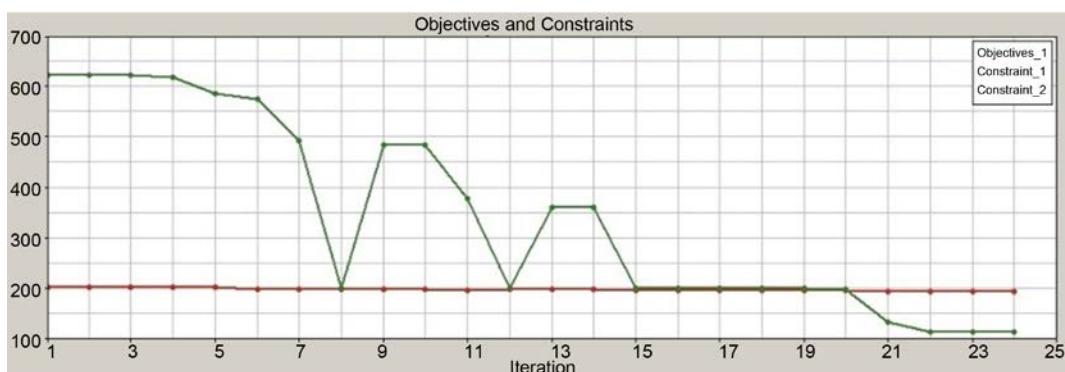


Figure 8. Solder joint layout optimization history

图 8. 焊点布局优化历史

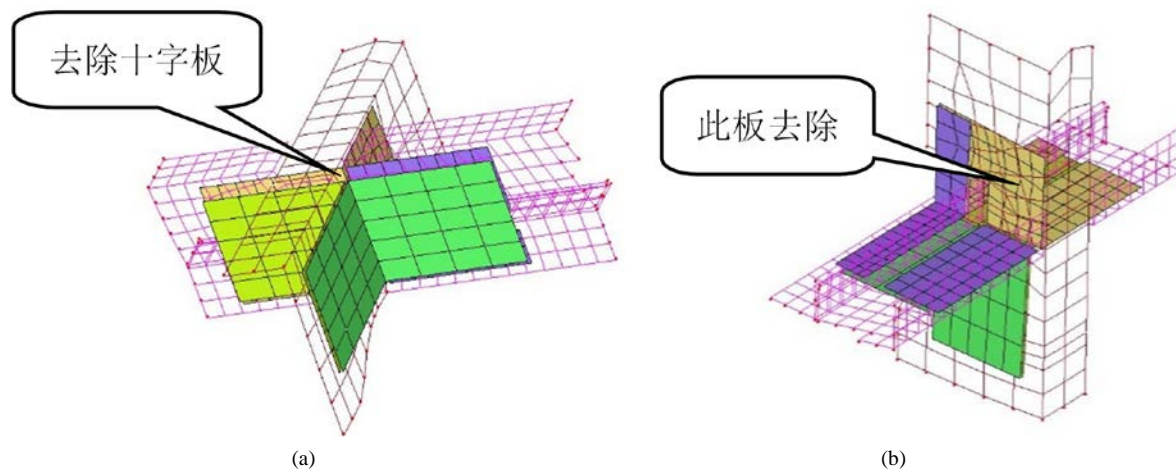


Figure 9. Shape optimization of beam after optimization

图 9. beam 梁优化后形状改变图

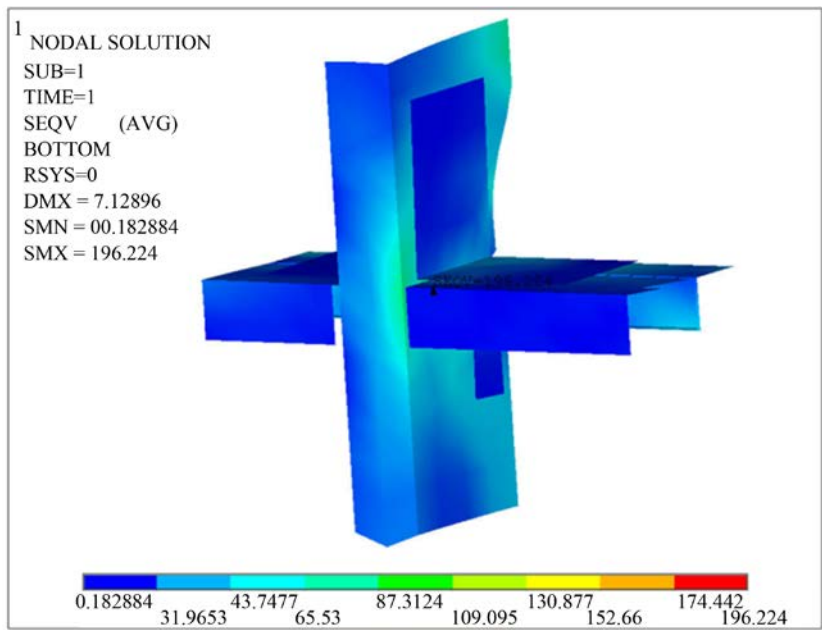


Figure 10. Stress distribution of weld layout optimization  
 图 10. 焊点布局优化后应力分布图

结果表明若想继续降低应力需增加全部板厚。

### 4.3. 焊点布局优化(GA 法)

#### 4.3.1. 仅对 beam 梁拓扑优化

在优化求解器中选择 GA 方法,设计变量:单独设置 34 个 beam 梁材料的弹性模量值为 183,000 MPa, 下限为 1 MPa, 上限为 183,000 MPa; 设置约束条件:子模型所有节点最大应力值小于等于 180 MPa; 设置目标函数:弹性模量总和最小。设置好后执行优化,优化结果如图 12 所示。根据要求,去掉小于 1000 MPa 弹性模量的 beam 梁 6 个。形状改变图如图 13 所示; 得应力云图如图 14 所示,在 bottom 面,最大值为 193 MPa。

#### 4.3.2. 对结构尺寸优化

再对 5 个补强板进行优化,同理在优化求解器中选择 GA 方法,设计变量:单独设置 5 块板厚度值为 4 mm, 下限为 1.5 mm, 上限为 4 mm; 设置约束条件:子模型所有节点最大应力值小于等于 180 MPa; 设置目标函数:应力值最低。设置好后执行优化,优化结果如图 15。根据要求,分别改变厚度以降低应力值,最大应力值降低到 181.9 MPa,优化结果与用 SQP 优化结果基本一致。

### 4.4. 计算结果对比

优化方法	设计变量	目标函数	改前应力值	改后应力值
序列规划法 SQP	34 个 beam 梁	弹性模量总和最小	202MPa	193MPa
序列规划法 SQP	5 块板厚	节点应力值最低	193MPa	185MPa
遗传算法 GA	34 个 beam 梁	弹性模量总和最小	202Mpa	193MPa
遗传算法 GA	5 块板厚	节点应力值最低	193MPa	182MPa



## 5. 结论

本次对车体补强结构整体进行了优化，解决了直接用 HyperMesh 导出 CDB 文件进行优化的难题。使用序列规划法优化，结果显示有 4 个 beam 梁的弹性模量值在 1000 以下，得到优化结果后取出此 4 个 beam 梁并去除与之相连的局部补强板；使用遗传算法优化，结果显示有 6 个 beam 梁的弹性模量值在 1000 以下，得到优化结果后取出此 6 个 beam 梁并去除与之相连的局部补强板。结构改变后放入 ANSYS

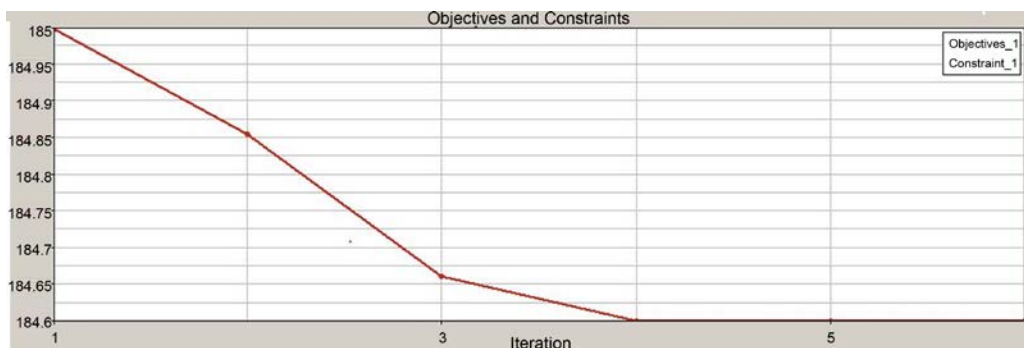


Figure 11. Numerical simulation of the target constraint function and variable iteration step

图 11. 目标约束函数及变量迭代步骤数值变换图

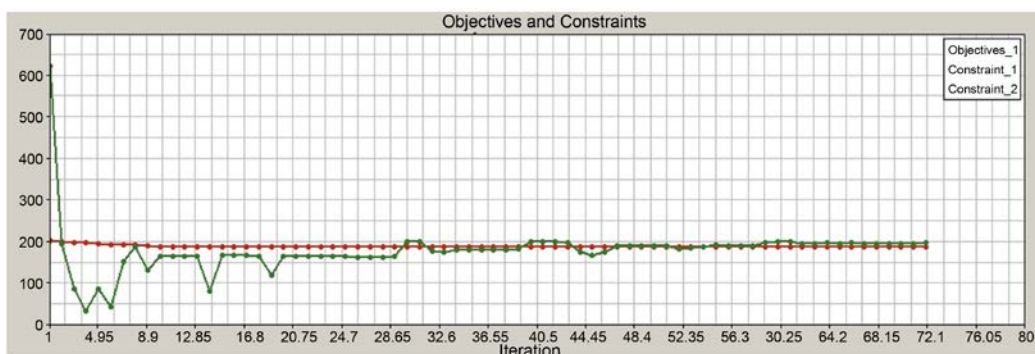


Figure 12. Iterative history of solder joint layout optimization

图 12. 焊点布局优化迭代历史

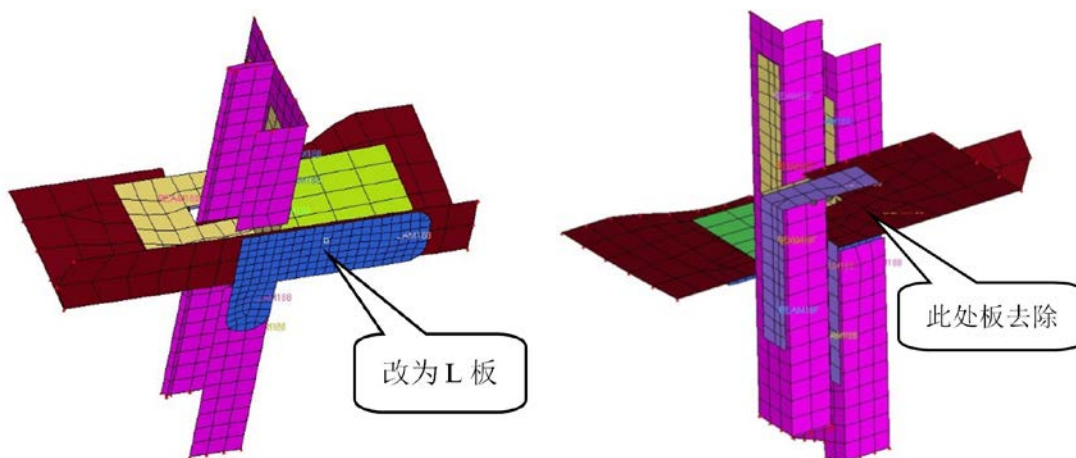


Figure 13. Shape change of beam after optimization

图 13. Beam 梁优化后形状改变图

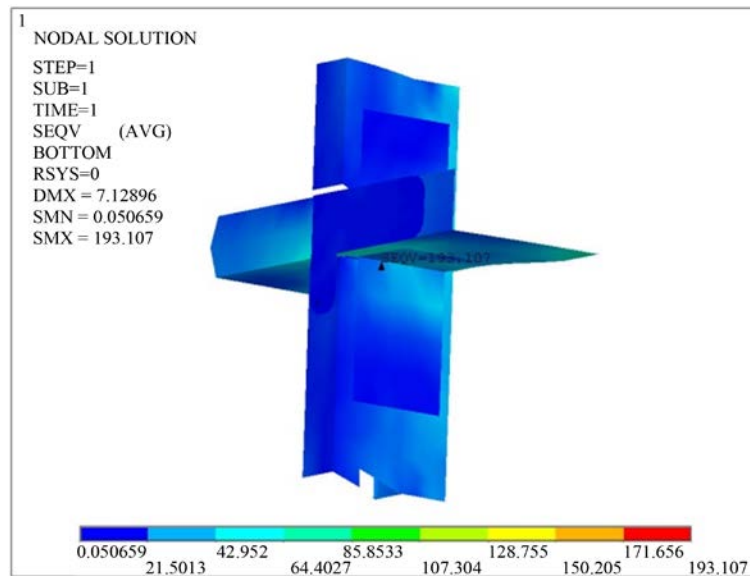


Figure 14. Stress distribution map of solder joint optimization  
图 14. 焊点优化应力分布图

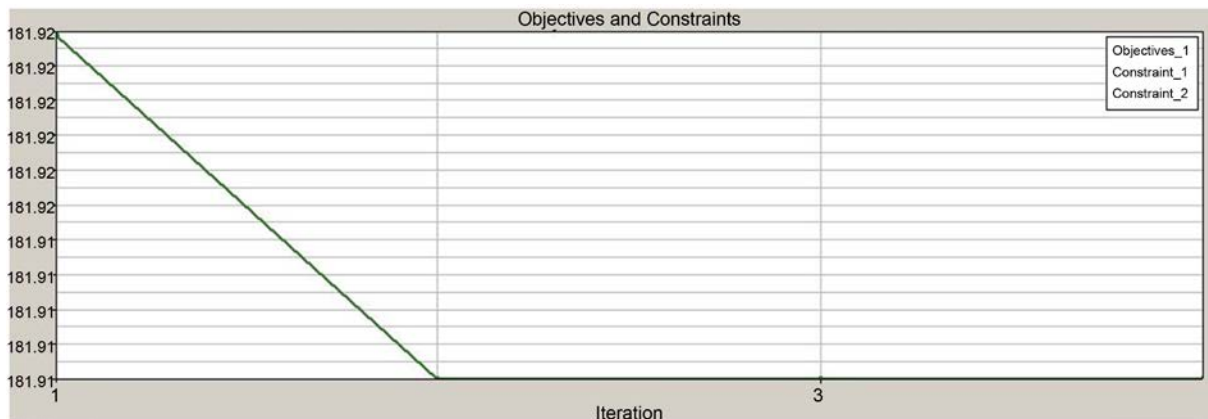


Figure 15. Numerical simulation of the target constraint function and variable iteration step  
图 15. 目标约束函数及变量迭代步骤数值变换图

重新计算，得到结果与直接优化产生一致，至此表明优化结果能合理的应用到实际中，并能通过优化达到减材减重的效果。

### 参考文献 (References)

- [1] 徐杰. 轿车车身焊点布置优化研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2010.
- [2] 张军, 段丽芳, 李向伟, 等. 基于有限元分析的铁路货车车体优化设计[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(2): 1-4.
- [3] 陈勇敢, 毕传兴, 张永斌, 等. 拓扑优化在某 SRV 白车身焊点缩减中的应用[J]. 汽车工程, 2011, 33(8): 733-737.
- [4] 谢素明, 穆伟, 高阳. 不锈钢点焊车体结构稳定性分析及局部焊点布局优化[J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(4): 12-16.
- [5] 潘迪夫, 朱亚男. 基于多目标遗传算法的机车二系承载荷载调整优化方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(2): 76-80.
- [6] 吴洪亮, 陈文琳. 基于 HyperStudy 的多工况铝合金车门尺寸优化[J]. 汽车工程师, 2014(4): 34-36.

- 
- [7] 刘磊, 马爱军, 刘洪英, 等. 基于 HyperStudy 的航天器结构多目标优化设计[J]. 智能制造, 2016(6): 34-36.
- [8] 茹卫东, 欧旻韬, 焦柯. HyperStudy 在框架结构抗震优化设计中的应用[J]. 广东土木与建筑, 2011(8): 3-5.
- [9] 王钰栋, 金磊, 洪清泉. HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] 洪清泉. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)