

基于车身装配结构优化的 改进图分解算法*

侯文彬, 侯大军, 徐金亭, 张伟

(工业装备结构分析国家重点实验室(大连理工大学);
大连理工大学 运载工程与力学学部 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在考虑车身制造和装配成本的前提下对车身装配结构优化方法进行了研究,提出一种改进的图分解算法将车身装配结构最优地分解为一组部件.以白车身侧围的装配模型为例,将结构的几何图形转化为与之对应的关系拓扑图,再分割该关系拓扑图为一组工程约束下的单连通不交叉子图集,结合遗传算法中的算子操作,利用有限单元法分析并计算得到产品几何图形的最优分割,采用 NSGA-II 算法并实现该装配体综合性能最优的目标.

关键词: 车身设计; 装配结构; 多目标优化; 图分解

中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.05.007

引 言

在车身概念设计阶段,为实现车身结构的优化设计,需要确定车身的总体装配结构布置,以便于“自顶向下”地进行零部件设计.车身的结构性能、可装配性、可制造性是适用于评价车身设计方案的重要指标.由于车身是一个由部件及其连接组成的复杂的装配体^[1],因此在确定车身装配结构和布置时,对以上3个指标需要综合考察,否则会对后期车身制造、性能以及成本控制产生重要影响.车身的主要结构性能指标体现为车身刚度,它对汽车的 NVH 性能和安全性产生重要影响^[2].车身可装配性是指装配单元能以相对较低的成本和较短的时间顺利地组装成整车车身的的能力^[3].车身可制造性是根据车身设计原理方案对应的各种可能的制造技术途径和实际具有的能力,来评估制造风险和成本^[4].

Boothroyd 和 Dewhurst^[5]被认为在可装配性设计(DFA)和可制造性设计(DFM)理论方法中做出了主要贡献,首次通过减少装配部件数量降低装配成本.在车身概念设计阶段,考虑可装配性、可制造性和结构性能的车身结构设计也需要将车身分解为各个部件相连接,然后通过优化方法实现车身整体结构性能最优.Lyu, Saitou 采用装配图进行分解的方法,对于自行车结构整体进行了拓扑优化,提高了该产品的结构性能^[6].本文结合车身侧围装配结构,给出了多目标优化模型,提出改进的图分解算法以实施优化过程.

* 收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2015-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(11272077);教育部留学回国人员科研启动基金

作者简介: 侯文彬(1973—),男,河北人,教授,博士,博士生导师(通讯作者. Tel: +86-411-84706474; E-mail: houwb@dlut.edu.cn).

1 图分解算法及其改进

1.1 图分解算法

装配结构的优化是在对结构分解的基础上进行离散的数学问题,且涉及多个性能评价,属多目标优化问题^[7],因此选用能处理离散的多目标优化算法是解决问题的出发点^[8].图分解算法致力于将结构分解并使其数据存储能高效地与现有优化算法相匹配,因而本文采用图分解算法^[9].

这一小节简要解释本文所采用的图分解算法的原理,以及实验过程中对于提高算法效率、增加决策变量约束的方法,保证数值实验的合理与高效.算法基本步骤如下:

1) 由设计者给出的可制造部件尺寸及形状决定接头的潜在位置,将车身结构图转化为车身拓扑连接关系图,建立与之匹配的具体结构的三维有限元模型;

2) 将车身拓扑连接关系图按照给定约束自动分解为 1 组子图,每组子图代表 1 个个体,依据遗传算法开始优化过程,迭代收敛后得到最优的 1 组子图,再由映射关系将设计者所需的个体子图转化为车身结构图.

在具体流程中,通常使用如图 1 所示的简化后的乘用车侧围模型作为实验对象,图中不同颜色部分即为分别制造的子部件,采用简化模型方法在汽车车身概念设计阶段被广泛采用.

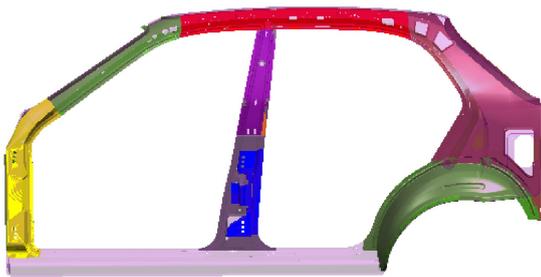


图 1 侧围实例图

Fig. 1 The model of a side frame for a car

为方便讨论,这里给出相关术语的介绍:

拓扑图 $\text{Graph} = (V, E)$: 其中 V 为节点集, E 为边集, 拓扑图 Graph 又被称作无向图^[10].

子图: 对于两个无向图 $\text{Graph}_1 = (V_1, E_1)$ 和 $\text{Graph}_2 = (V_2, E_2)$ 而言, 若 $V_1 \supseteq V_2$, 且 $E_1 \supseteq E_2$, 则称无向图 Graph_2 为无向图 Graph_1 的子图.

决策变量定义 在无向图的边集中, 随机移除若干条边后即形成对原图的 1 次分割, 将 1 组二进制变量 x_i 组成的向量称为对图 Graph 的分割向量:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{|E|}), x_i = \begin{cases} 0, & \text{edge } i \text{ removed in graph partition,} \\ 1, & \text{others.} \end{cases} \quad (1)$$

不同连接位置处接头的设计也是复杂而多样的, 因此代表不同位置的接头属性也作为决策变量的一环出现:

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_{|E|}), \quad (2)$$

这里向量 $\mathbf{y}_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}) \in F_{\text{BEAM}}$ 为第 i 个接头位置处接头设计方案中的 1 种, F_{BEAM} 为可行的梁接头设计集.

1.2 图分解算法改进

算法在对拓扑图进行分割时,分割是否合理成为本文致力解决的问题之一.对于随机产生的分割向量而言,并非每一个分割向量都能在产品结构图中得到合理的解释,如图 2 所示.矩形结构图 2(a)被分解为图 2(b)中的 4 个基本单元,并在图 2(c)中建立与产品结构图所对应的产品拓扑连接关系图,图 2(d)为该结构进行了 1 次分割,移除边 E_2 后形成的子图,图 2(e)为将子图 2(d)映射为实际的子部件结构图.由图 2(e)不难看出,这次的分割是不合理的,整体结构上的这个接头在制造过程中也不被允许.这意味着:在保证一个被分割下来的子图连通性的情况下,在其对应的拓扑连接关系图中,子图所包含的全部节点之间的连接关系(即拓扑连接关系图中的边)应保持父图中这些节点之间的连接关系:

$$\mathbf{x}_{\text{fixed}} = \text{GRAPHFIXED}(\text{Graph}(V, E), \mathbf{x}), \tag{3}$$

这里 $\text{Graph}(V, E)$ 表示父图包含的全部信息, \mathbf{x} 代表分割向量(即一种分解方案), 函数 $\text{GRAPHFIXED}()$ 在输入父图信息和分割向量后对分割向量 \mathbf{x} 按预设的修正方法进行修正,并返回一个修正后的分割向量 $\mathbf{x}_{\text{fixed}}$, 这里采用深度优先搜索算法^[11].

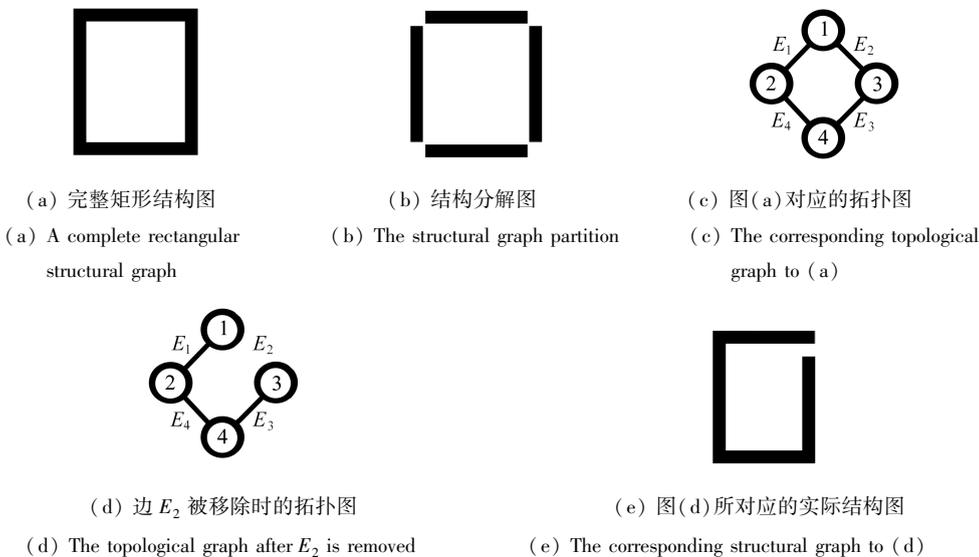


图 2 不合理的结构图分解

Fig. 2 An irrational structural graph partition

此约束体现着将计算方法应用在实际工程领域时,对算法中某些表达的实际意义的深入理解与分析.本文在采用此约束后,可避免不合理个体的产生,并且遗传算法种群中不合理个体导致进化方向出现偏差的问题得到很大的抑制.同时,全部可进化个体数量的减小也大大加快了群体进化速度,在计算效率方面也有较大提高.

2 车身装配结构优化模型

目标函数 在给定载荷及约束条件下,本文评价的 3 个目标函数如下:

结构刚度 最大化装配后结构的刚度,并估计刚度的值.刚度的测量可以转化为在有限元模型中预定义的节点处的位移的负值:

$$f_{\text{stiffness}} = - \text{Displacement}(\text{Graph}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}), \tag{4}$$

这里函数 $\text{Displacement}()$ 的输入为:分割向量 \mathbf{x} ,接头设计向量 \mathbf{Y} ; 输出为:有限元模型中预定

义的节点处位移量。

可制造性 制造成本越低,称其可制造性越高。通过计算被分割向量 \mathbf{x} 分割后形成的子部件的制造难易度来评价。

$$f_{\text{manu}} = - \sum_{i=1}^n \text{Diecost}(i, \text{Graph}(\mathbf{x})) . \quad (5)$$

可装配性 可装配性由装配过程的成本来评估,所需成本越低,称其可装配性越高^[12]。通常在汽车的组装过程中,零部件的装配采用点焊的方式。因此,组装过程的成本与部件连接处焊点数量成正比关系:

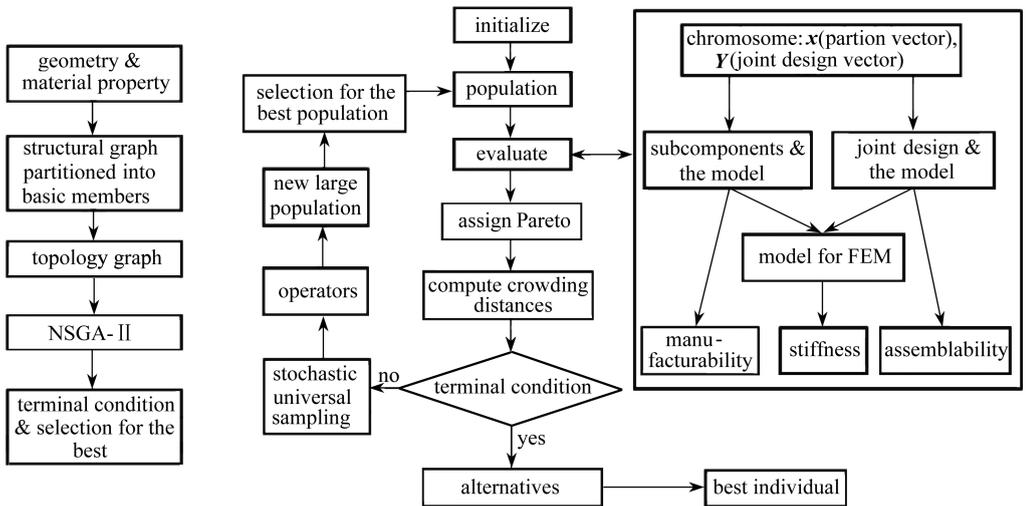
$$f_{\text{assem}} = - \sum_{i=1}^n \text{Weldspots}_i(\text{Graph}(\mathbf{x}), \mathbf{Y}) . \quad (6)$$

多目标优化模型

$$\begin{cases} \text{s.t.} & \text{maximize } \{f_{\text{stiffness}}, f_{\text{manu}}, f_{\text{assem}}\}, \\ & \mathbf{x} \in \{0, 1\}^{|E|} \text{ and satisfy function GRAPHFIXED}(), \\ & \mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_{|E|}), \mathbf{y}_i \in F_{\text{BEAM}}. \end{cases} \quad (7)$$

这是一个非线性多目标优化问题^[13],本文采用修正后的非支配排序遗传算法 NSGA-II^[14]。

算法流程 NSGA-II 是 Deb 等在其提出的 NSGA 算法基础上的改进,通过引入精英策略、快速非支配排序、拥挤距离评价,其优化结果优于其它多目标优化算法。算法包括建立种群、二进制选择父代,交叉和变异等基本过程,配合图的数据结构,完成优化,如图 3。



(a) 单个个体计算流程

(b) NSGA-II 算法流程

(a) The calculation procedure for each individual

(b) The flowchart of algorithm NSGA-II

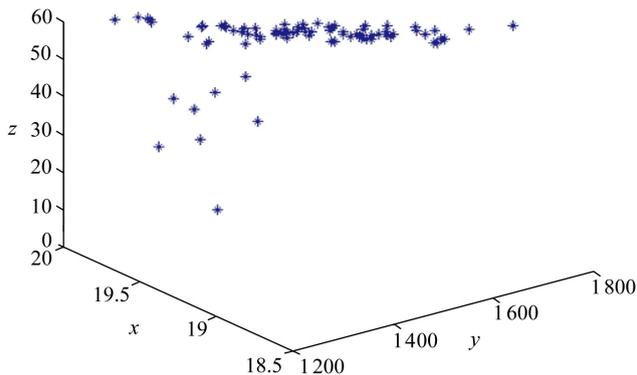
图 3 算法流程图

Fig. 3 The flowcharts of the algorithm details

3 算例研究

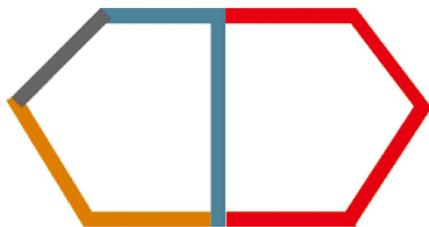
在本节中将讨论四门乘用车白车身侧围的有限元模型在标准静载条件下的响应情况。种群规模设定为 200 个,迭代次数为 100 代,组建新种群时子代对父代的替换率为 50%,交叉概率为 90%,变异概率为 10%。在这里种群规模和迭代次数是在历经多次模拟根据数据反馈的收

敛情况而做出的选择,最初判定进化终止的条件是此代种群与上一代种群的平均适应度函数变化率小于 3%。若干次测试统计数据表明,将判定进化终止的条件定为 100 代。



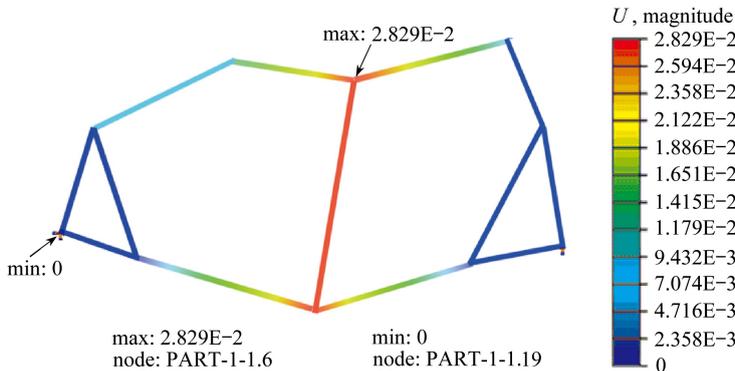
(a) 最后一代群体散点图

(a) Scatter diagram of the last generation



(b) 最优个体结构分解图

(b) The structural graph partition corresponding to the best individuals



(c) 最优个体变形示意图

(c) Deformed graph of the best individual

图 4 优化后的位移图与结构分解图

Fig. 4 The displacement nephogram and partition graph of the structure after optimization

分解后的基本单元由梁单元来模拟,其截面形状、截面积、惯性矩等属性由汽车车身结构等一般性研究的结果^[15]给出。由于侧围具有复杂的几何特征,各个基本单元间的截面匹配时所产生的残余应力和摩擦情况多变难以模拟,因此,在工业中,将焊点模拟为一组扭转弹簧是标准方法,虽然也有相关研究人员通过研究即将匹配的单元的几何外形和截面属性来计算接头属性,但最终还是将接头模拟成扭转弹簧单元。这些扭转弹簧的刚度由对更细致的模型的试验获得。

在迭代过程结束之后,得到的最终代种群中的 200 个个体大部分位于同一 Pareto 面上(在选优的过程中,精英个体有较大几率重复出现),如图 4(a)。由于拥挤距离的定义主要是为形成种群多样性,因此对最优个体的选择时需要考虑的是 3 方面的综合评分,并不简单按照拥挤距离排序来分析。假设作为车身结构的设计者,令刚度、可制造性和可装配性 3 个目标函数的权重相等(当设计者将某一方面的函数值作为主要目标考察时,可适当提高其权重),将全部个体的 3 个目标函数分别归一化的值求和得到个体评分表,按评分表中选取迭代最后一代中

最优的 10 个个体制成表格如表 1 所示,评分经过去单位化处理,只具有比较意义,其工程值按目标函数定义反推^[16]。

表 1 最后一代中按综合评分选取的 10 个最优个体

Table 1 The best 10 individuals in the last generation according to the comprehensive scores

No.	partition vector	assemblability	manufacturability	stiffness	comprehensive
		score	score	score	score
1	[0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1]	1 756	18.881 5	59.917 9	1.999 9
2	[0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 1]	1 712	19.023 0	58.091 8	2.011 1
3	[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	1 319	19.819 9	59.851 6	2.012 6
4	[0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]	1 317	19.829 9	59.817 1	2.017 6
5	[0 1 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0]	1 489	19.500 5	58.223 4	2.019 6
6	[0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 1]	1 614	19.236 4	58.337 8	2.022 0
7	[0 0 0 1 0 1 1 1 1 0 0 1]	1 662	19.201 4	56.262 8	2.046 0
8	[0 0 0 1 0 0 1 1 0 0 0 1]	1 521	19.482 7	57.588 0	2.055 8
9	[0 0 1 1 1 0 1 0 0 0 0 1]	1 545	19.463 1	57.265 0	2.079 9
10	[0 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 1]	1 569	19.465 9	54.657 1	2.080 4

本例中,最优个体的产品结构图如图 4 示。图 4(a)为最后一代全部个体的三维分布图(坐标值为对应属性评分);图 4(b)为最优个体对应的结构分解图,这里每种颜色所对应的区域为一个子部件;图 4(c)为个体的位移变形图。该结构将通过几何结构映射到车身侧围结构中,作为侧围装配设计的指导。

4 总结与展望

本文以车身侧围结构刚度、制造性和装配性为目标,提出了改进的图分解算法对装配结构进行优化设计,最后得到最优分解后的装配体结构图。主要思路是将产品结构图转换为产品拓扑连接关系图,对产生的新个体用约束函数进行合理性修正,在此基础上运用一种新型的非支配排序遗传算法优化整个群体。如算例研究中的结果所示,最优的个体既非无接头的全连接结构,也不是接头最多的情况,而是如算法所期待的被分割为连接的子图集。该优化方法可支持车身结构概念设计装配结构设计问题,指导设计人员进行装配规划。

随着研究工作的进行,关于其它目标的规划也将逐步纳入该方法的研究和改进中,包括梁板混合结构的优化,扭转载荷的施加,碰撞工况的工程需求等将作为未来一段时间内新的研究目标。

参考文献(References):

- [1] 付宜利,田立中,董正卫,谢龙. 装配关系的有向图表达方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(2): 149-153. (FU Yi-li, TIAN Li-zhong, DONG Zheng-wei, XIE Long. Representation of assembly relations by directional assembly connection graph [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2003, 9(2): 149-153. (in Chinese))
- [2] Ashley S. Steel cars face a weighty decision[J]. *Mechanical Engineering*, 1997, 119(2): 56-61.
- [3] 赵荣远. 汽车虚拟装配技术及其可装配性评价分析[J]. 上海汽车, 2013(3): 45-49. (ZHAO Rong-yuan. Virtual assembly technology of vehicle and the analysis of its assemblability [J]. *Shanghai Auto*, 2013(3): 45-49. (in Chinese))

- [4] 佟振博, 孙朝阳, 王刚, 吕民, 高国安. 面向工程系统研制的可制造性评价策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, **11**(10): 1461-1464. (TONG Zhen-bo, SUN Chao-yang, WANG Gang, LÜ Min, GAO Guo-an. Research on manufacturability evaluation strategy oriented to development of engineering system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, **11**(10): 1461-1464. (in Chinese))
- [5] Boothroyd G, Dewhurst P. *Product Design for Manufacturing and Assembly*[M]. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [6] Lyu N, Saitou K. Topology optimization of multicomponent beam structure via decomposition-based assembly synthesis[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, **127**(2): 170-183.
- [7] 谢然. 多目标优化方法在车身结构轻量化设计中的应用研究[D]. 硕士学位论文. 广州: 华南理工大学, 2010. (XIE Ran. Multi-objective optimization methods in the light-weight design of the auto-body structure[D]. Master Thesis. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [8] 王江涛, 戴国洪, 朱林立. 基于分层理论和连接关系的装配结构树自动快速生成研究[J]. 机械设计, 2012, **29**(10): 15-19. (WANG Jiang-tao, DAI Guo-hong, ZHU Lin-li. Study of assembly structure tree rapid and automatic planning based on base part and connected-relation[J]. *Journal of Machine Design*, 2012, **29**(10): 15-19. (in Chinese))
- [9] 付宜利, 田立中, 谢龙, 马玉林. 基于有向割集分解的装配序列生成方法[J]. 机械工程学报, 2003, **39**(6): 58-62. (FU Yi-li, TIAN Li-zhong, XIE Long, MA Yu-lin. Assembly sequences planning based on cut set analysis of directional graph[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, **39**(6): 58-62. (in Chinese))
- [10] 蔡伟, 张桂香. 基于成本和并行装配序列有向图求解[J]. 微计算机信息, 2012, **28**(2): 22-24. (CAI Wei, ZHANG Gui-xiang. The solution of assembly sequence based on assembly cost and parallel assembly with orientation graph[J]. *Micro-Computer Information*, 2012, **28**(2): 22-24. (in Chinese))
- [11] 刘中华, 张颖超. 深度优先搜索的非递归算法[J]. 科技信息, 2010(25): 160-162. (LIU Zhong-hua, ZHANG Ying-chao. Depth-first search by non-recursive algorithm[J]. *Science & Technology Information*, 2010(25): 160-162. (in Chinese))
- [12] 刘琼, 徐翱, 邱浩波, 高亮. 面向装配序列规划的装配成本评价研究[J]. 机械设计与制造, 2007(4): 165-167. (LIU Qiong, XU Ao, QIU Hao-bo, GAO Liang. Research on assembly cost evaluation for assembly sequence planning[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2007(4): 165-167. (in Chinese))
- [13] Coello C A C, Van Veldhuizen D A, Lamont G B. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*[M]. New York: Kluwer Academic, 2002.
- [14] Deb K, Agrawal S, Pratab A, Meyarivan T. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [R]. KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 2000.
- [15] Malen D, Kikuchi N. Automotive body structure—a GM sponsored course in the university of Michigan[R]. ME599 Coursepack, University of Michigan, 2002.
- [16] 赵勇, 彭再云, 张石生. 向量优化问题有效点集的稳定性[J]. 应用数学和力学, 2013, **34**(6): 643-650. (ZHAO Yong, PENG Zai-yun, ZHANG Shi-sheng. Stability of the sets of efficient points of vector-valued optimization problem[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, **34**(6): 643-650. (in Chinese))

A Modified Graph-Partitioning Algorithm for Vehicle Body Assembly Structure Optimization

HOU Wen-bin, HOU Da-jun, XU Jin-ting, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment

(Dalian University of Technology) ; School of Automotive Engineering,

Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics,

Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, P.R.China)

Abstract : The optimization method for the vehicle body assembly structure was studied in view of the overall performance of manufacture and assembly. A modified graph-partitioning algorithm was proposed to optimally divide the vehicle body assembly structure into a set of components. A side frame model for the typical vehicle body in white was built as an example, in which the structure geometry was transformed to a topological graph at first, then the topological graph was partitioned into a set of simply connected and independent sub-graphs with constraints of engineering meanings. The genetic operators in algorithm NSGA-II were combined with the FEM analysis to calculate the optimal partition of the product structure geometry. The results show that the proposed method realizes the objective of optimal comprehensive performance for the vehicle body assembly structure.

Key words : vehicle body design; assembly structure; multi-objective optimization; graph partition

Foundation item : The National Natural Science Foundation of China(11272077)