

拓扑优化技术在汽车工业的应用

张卫红, 王敏

(西北工业大学 现代设计与集成制造教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要: 通过大量实例,介绍了拓扑优化技术在国外汽车业中的应用,包括车身结构件、车身覆盖件、锻件和铸件的设计,说明了拓扑优化的基本原理和一般过程,分析了现实中的困难,并指出了其对于提高产品质量、缩短设计周期的重要作用。

关键词: 拓扑优化; 有限元; 汽车设计

中图分类号: O189 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)01-0077-05

Applications of Topology Optimization in the Automobile Industry

ZHANG Wei-hong, WANG Min

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnic University, Xian 710072, China)

Abstract: The applications of topology optimization are presented including the design of body in white, the design of panels and the design of castings and forgings. Its basic theory, common process and current drawbacks are demonstrated. The great significance is pointed out as to shortening the design process and improving product quality.

Key words: topology optimization; finite element method; vehicle design

0 引言

拓扑优化技术是一项新兴的设计方法,它可以在方案设计阶段给出零部件甚至车身原型合理的材料布局,减轻结构重量。通过这项技术,企业能缩短设计周期,提高产品性能,减少昂贵的样件生产和整车测试的次数。

拓扑优化技术自从20世纪80年代末提出以来^[1],在航空航天、机械、船舶、微电子和新型材料设计等领域得到了广泛的应用^[2]。国外汽车企业的相关研究从90年代初开始^[3],目前应用广泛。国内应用很少,处于起步阶段,如红旗小轿车发动机罩内板的拓扑优化^[4]。

汽车工业的拓扑优化问题所覆盖的车辆类型有轿车、公共汽车^[5]、卡车等;优化对象包括车身本体构件(如前柱^[6]、发动机罩^[7])、白车身总体^[8]、底盘和发动机上的连杆^[9]和支撑部件^[5],以及轴承结构^[10]等;优化对象的制造方法现包括钣金加工、铸造和锻造;制造约束包括最小和最大结构尺寸、拔模或锻压的角度和方向、各类对称性条件等;优化目标和约束包括重量、柔顺度、能量吸收、自然频率、应力和最大位移等;所涉及学科包括静力学、多体运动学、塑性力学、振动、噪声、疲劳、优化算法和高性能科学计算等。

发达国家的政府组织和大公司,包括欧洲委员会^[7]、瑞典政府^[6]、德国政府^[7]、通用汽车公司等,都大力支持大学等科研机构开展相关研究。

拓扑优化技术在诸如福特^[11]、奥迪^[10]、宝马^[7]、沃尔沃^[6]、丰田^[12]、尼桑^[3]和平尼法尼那^[13]等公司的实际车型上得以使用。例如奥迪A8车型在车身和发动机上多处使用了拓扑优化技术^[10,14]。

收稿日期:2004-11-25. 基金项目:西北工业大学研究生创业种子基金(项目编号:Z20030057)。

第一作者简介:张卫红(1964~),男,博士,教授,博士生导师,长江学者。主要研究方向:多学科优化。E-mail:zhangwh@nwpu.edu.cn

现在通用的拓扑优化软件有 TOSCA(德国)、OptiShape(日本)、OptiSrtuct(美国)、Genesis(美国)等。它们在汽车产业界都有应用实例。而包括宝马在内的许多公司同时使用多种拓扑优化软件。另外,福特公司还开发了内部专用的拓扑优化软件。

1 拓扑优化方法简介和步骤

拓扑优化是在一定空间区域(骨架结构或连续体)内寻求材料最合理分布的一种优化方法^[2],它是一个迭代的过程。从预先定义的某种材料分布开始(如均匀分布),每一次迭代包含有限元分析、灵敏度计算和修改材料分布3个子步骤。在多次迭代后(通常20次以下),材料分布趋于稳定,优化即结束。对于连续空间问题,使用现有商业软件通常能得到材料0~1分布或接近0~1分布的设计结果。

骨架结构的拓扑优化的结果可直接用于设计,而连续体问题往往需要进一步的处理,需要软件和设计者的共同努力。

拓扑优化由以下5个步骤组成:准备工作、拓扑优化、结果后置处理、非参数化形状优化和CAD建模。也可能由于需要修改参数等原因,而对某一步或整个过程进行反复迭代。

1.1 准备工作

在进行优化以前,必须明确以下几个因素。

1) 设计区域。设计区域是优化对象可以占据的整个空间区域。一般通过考虑装配等实际因素,选取最大可能的区域,以充分挖掘优化潜力。设计区域一般采用几何上简单的形体,以简化有限元模型的建立;也可能为了尽快达到最优而采用已知接近最优的现有设计。优化对象上必须保留需要的孔洞。不能改变的实体部分(如连接部位等)应预先标出,使之不参与优化。

2) 目标和约束。目标函数可以是柔顺度、最大位移、自然频率或能量吸收,或以上几者的组合。材料用量(以实际所用材料的体积或重量来衡量)是必要的约束条件。但合适的材料用量往往在优化结果出来以前不能精确的预知,因此可能需要指定几个不同的材料用量分别进行优化,再在结果中选取最优。在拓扑优化过程中,可以针对不同的加工方式(如锻造、铸造、机加工等)来施加工艺约束,保证优化结果的可制造性。现在可施加的工艺约束有制造约束包括最小和最大结构尺寸、拔模(锻造)的角度和方向、各种对称性条件等。

3) 分析类型和模型。针对不同的目标函数,有限元分析的类型可以是静力学、模态分析、动力学分析。同一个拓扑优化问题可以进行几种不同类型的有限元分析,每种类型可以包含几种不同的载荷和固定(或运动)条件。如前所述,优化和有限元往往使用同一个模型。模型单元数目的多少决定了优化结果的真实程度,也决定了计算效率。实践证明,拓扑优化约97%的时间消耗在有限元分析过程中^[2],因此在估计计算时间时应主要考虑有限元分析。高阶单元比一阶单元精度高,优化结果往往较好,但有限元分析所需计算量和其他资源(内存或硬盘用量)要大得多。此外,应在优化迭代前试算一次,确保能得到稳定、准确的有限元解。

1.2 拓扑优化

用户可以监视优化过程。例如,在每一步迭代之后都可以查看目标、自变量的当前值。现在的商业软件通常在20步迭代之内能得出接近0~1分布的解。

1.3 结果的后处理

骨架结构的拓扑优化结果能直接利用,故可跳过此步。

1) 提取。连续体的拓扑优化结果以0~1分布表示,不能马上制造使用,在3维情况下甚至很难判断其具体形状。故必须将其转化为易于理解的表达方式,如表面三角形网格,或者转化为离散结构,如骨架结构或板-杆、板-梁结构等。如需要表面网格,可以将拓扑优化的原始结果视为材料密度这一连续标量函数在空间离散点的取值,借助于可视化技术,建立起密度函数的等值面,最终以表面三角形网格的形式来表示。通过调整等值面的值,可以使得表面网格覆盖的体积与优化过程中指定的体积约束相一致。

2) 光顺。由于拓扑优化是在有限元网格上进行的,所以结果不可避免的带有有限元网格的局限性,

如直线成为锯齿形状的折线。随着有限元网格的加密, 锯齿形状可以减弱, 但无法完全消除, 所以必须使用如相邻节点平均的其他办法。

3) 简化。从拓扑优化结果提取的网格往往含有大量单元, 超过了一般 CAD 软件所能承受的限制, 为建立 CAD 模型(见 1.5 小节)制造了障碍。考虑到提取的网格中包含了不少冗余信息, 可以将其进行简化, 如可以缩并同一平面上的单元。但简化过度也可能丢失一些细节。

1.4 非参数化形状优化

拓扑优化旨在求得刚度最大(即应变能最小)的结构, 并没有考虑强度条件。所以尽管整体最优, 往往在局部上还不够完善, 会出现应力集中的情况。为消除应力集中, 必须进行局部修改, 如形状优化。可以在建立 CAD 模型(见 1.5 小节)完成后, 对 CAD 模型进行常规的参数优化, 也可以直接对有限元模型进行优化, 即所谓非参数化形状优化。某些优化软件, 如 Tosca 和 OptiStruct 等, 具有非参数化形状优化的功能。由于第 3 步提取出的只是表面网格, 所以在非参数化形状优化之前, 还应将表面网格转化为实体网格。

1.5 建立 CAD 模型

除了车身本体结构外, 汽车设计中的拓扑优化问题绝大多数是建立在 3 维连续空间里的。由于计算机很难理解 3 维优化结果所体现的设计意图, 也不能使用简单的造型元素将这些设计意图表达出来, 所以至今还没有一种通用的方法, 能依靠计算机从优化结果中自动提取出 CAD 模型。因此, 这一步仍需要熟练掌握造型技术的设计人员花费大量时间。

通常建立 CAD 模型的方法如下。首先通过数据接口(如 STL)将优化结果简化后的表面网格导入 CAD 系统。然后借助于 CAD 系统的逆向求反的功能, 参照优化结果, 逐步建立起参数化 CAD 模型。由于要求所使用的 CAD 具有较高级的逆向工程模块, 所以一般需要 Catia, UG 等高端 CAD 软件的支持。

在形成 CAD 模型后, 可以再次划分网格, 进行有限元分析, 通过比较 CAD 模型前后目标函数的偏差来评价建模过程对原始结果的忠实程度。

2 现有软件

按构成分, 拓扑优化软件可分为两种。(1) TOSCA(德国 FE - DESIGN 公司)、OptiShape(日本 QUINT 公司)等只有优化模块, 需要与 Nastran 等有限元软件配合使用。(2) OptiStruct(美国 Altair 公司)、Genesis(美国 VR & D 公司)等是有限元分析 - 优化集成系统, 在拓扑优化时使用自身有限元分析功能。

除了以上商业通用拓扑优化软件之外, 汽车厂商也开发了专用软件。例如, 福特汽车公司在 RAIOS 多学科有限元分析系统的基础上, 开发了用于提高被动安全性的专用拓扑优化模块^[15]。此模块基于一套预定义的优化准则, 力争提高车身在变形过程中的能量吸收, 并不需要考虑灵敏度。非商业化软件有丹麦科技大学开发的 TOPOPT^[16]等。

3 实例

3.1 白车身早期整体优化

捷豹(Jaguar)公司利用拓扑优化技术, 在外观设计给出外形概念后即对车身本体进行综合优化, 改变了以往设计时分别对车身各总成优化后再考虑整体的做法, 提高了设计效率和产品质量^[8]。

第一步是获取拓扑优化的设计区域。首先将 A 级曲面组成的外形划分为面单元, 面单元包围的体积就是总体设计区域; 再根据以往经验预留出前后门、成员区域、发动机等需要排除的区域的大致位置并划分网格; 此外还要预留

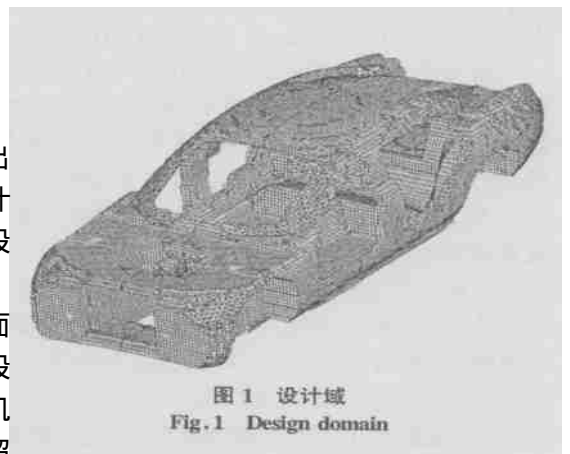


图 1 设计域
Fig.1 Design domain

吸收碰撞能量的前后长梁等位置;内外面网格之间的空间就是最终的设计区域。接下来将最终设计域划分为六面体占优的3维实体网格(图1),并作少许手工修补。体积约束指定为优化区域的30%。

车身在实际工作中要经历多种工况,其中最重要的几种工况可分为被动安全性和振动、噪声、舒适度两大类。优化目标在这里是几种工况的综合。如扭转工况占45%的权重,正撞、侧撞、追尾、翻滚分别占15%,10%,10%和5%的权重。

拓扑优化结果如图2所示。进一步设计将优化结果转化为板-梁模型(图3)。后续工作包括:对板-梁模型进行尺寸优化以达到预定扭转刚度($350\,000\text{ N}\cdot\text{m}/\text{g}$);在正撞时考虑非线性因素,对前后吸能区进行尺寸优化;优化考虑焊点定义的半详细模型等。所有步骤结束时白车身总重165 kg,比参考设计重量的一半还轻,而扭转刚度却提高到参考设计的2倍。

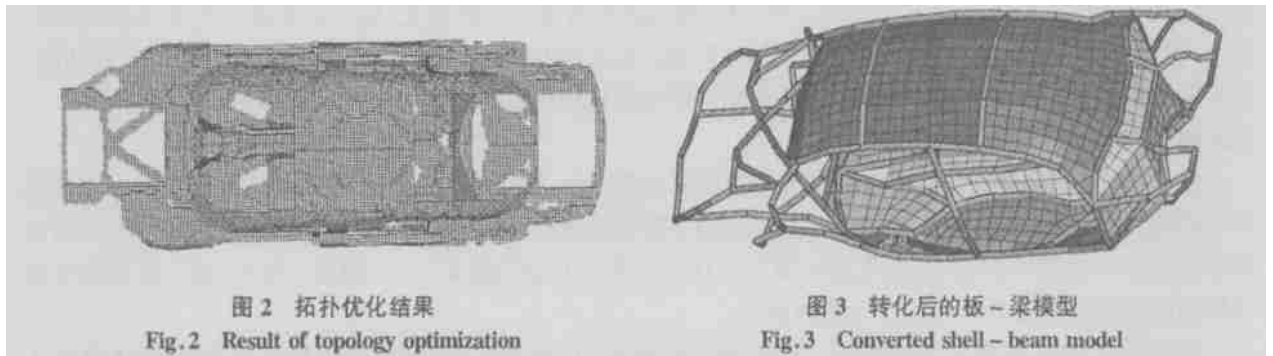


图2 拓扑优化结果

Fig.2 Result of topology optimization

图3 转化后的板-梁模型

Fig.3 Converted shell-beam model

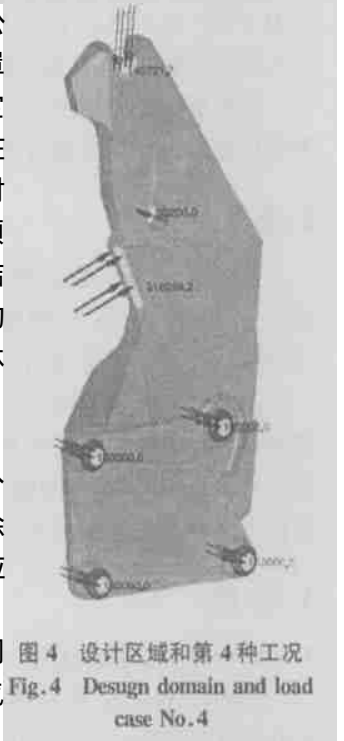
拓扑优化在车身设计应用上的其他例子还有很多。例如,平尼法里那公司通过拓扑优化技术,在保证刚度不低于临界值的约束下,减轻了某发动机罩的重量达3 kg^[13]。由欧盟委员会资助的高性能优化(HIPOP)项目,建立了宝马3系列汽车白车身体素模型;考虑6种不同载荷,4种不同边界条件,在IBM大型主机上对前翼板进行了拓扑优化。高性能计算资源的使用将计算时间从1个半月压缩到3 h^[7]。由瑞典战略研究基金会资助的集成汽车结构项目(ISV)利用拓扑优化的方法,为沃尔沃安全概念车(SCC)设计了其前柱。结果形成了一系列盒状结构,使得驾驶员视线能透过前柱的空洞,在减轻重量的同时提高了主动安全性^[6]。丰田公司还使用VB/Excel自主开发了车身本体板-杆模型的拓扑优化软件^[12]。

3.2 铸件和锻件的优化

德国IABG公司利用拓扑优化技术进行一个支架的刚度最大化设计。分别提出了5种工况(图4)。优化结果的应力分布如图5所示。从图中可知除了小部分地方外应力分布基本均匀。随后又进行了非参数化形状优化,将应力集中减小到 $666\text{ N}/\text{mm}^2$ 。最终的CAD模型如图6所示^[9]。

因为技术相对成熟,铸件和锻件拓扑优化的例子相当多。例如,福特公司在考虑接触条件和制造约束的情况下,对1.25/1.4 L ZETEC-SE发动机汽缸连杆进行了拓扑优化,结果使原先相差较大的拉/压变形量基本一致^[11]。

奥迪公司对装备A8车型的V6 FSI发动机的支撑进行了拓扑优化。优化后1阶频率提高30%,重量减轻20%^[10]。奥迪公司的R4 FSI发动机辅助支架,结构、载荷都很复杂,选用原始设计为设计域,拓扑优化后重量减轻20%,1阶频率不变^[10]。又如奥迪A8前桥的一个横向连杆,沿用A6的设计,应力超标40%,使用形状优化方法无法满足设计要求。采用拓扑优化技术的新设计减重10%,应力集中减小45%,最大位移减小15%,第1个样件即通过所有力学测试,达到设计要求^[14]。大众汽车的一个发动机罩支架,原始设计重950 g,拓扑优化后重730 g,强度和刚度不变。按每千克价格为0.80美元计算,仅材料1项每年就可节省35 200美元^[17]。还有大众汽车的发动机强化板,也经过了拓扑优化^[18]。德国TECOSIM公司利用拓

图4 设计区域和第4种工况
Fig.4 Design domain and load case No.4

扑优化方法,重新设计了汽车散热器耳片,使其减重 31%,应力集中减轻 64%,最大位移减小 52%^[5]。

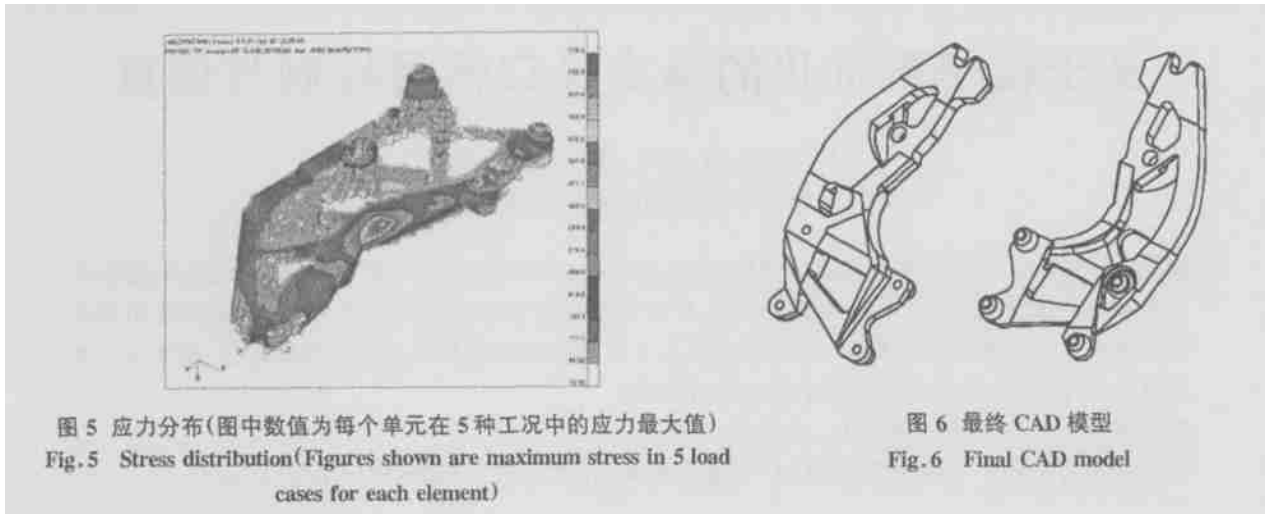


图 5 应力分布(图中数值为每个单元在 5 种工况中的应力最大值)
Fig.5 Stress distribution (Figures shown are maximum stress in 5 load cases for each element)

图 6 最终 CAD 模型
Fig.6 Final CAD model

4 困难和挑战

一些实际因素阻碍了包括拓扑优化在内的数值优化技术的应用^[19]。比如,CAD 系统与 CAE 系统的接口还很不完善,许多 CAD 数据并没有参数化,使得优化软件修改 CAD 模型变得困难。优化条件往往并不能很精确的给定,如被动安全性优化中,碰撞角度、驾驶员位置、材料属性都会影响结果的健壮性。而如果在优化中考虑这些因素的随机分布,则现有的计算资源不能满足要求。尽管多学科优化的价值得到广泛的承认,不同学科(结构、疲劳和被动安全)往往在研发的不同阶段建立模型(因为要求的细节不同),因此确保这些模型的一致性成了一大难题。企业内部信心也是拓扑优化能否成功的一个关键因素。比如,TRW 公司使用拓扑优化,对其 GGG5 型刹车罩进行轻量化设计,设计者认可有限元分析的一般结果,但对拓扑优化存在怀疑,因此在得到优化结果后第 1 次建立 CAD 模型时,没有完全参照拓扑优化结果来定型,致使 CAD 模型比拓扑优化结果重 8%,刚度也偏小,没有达到设计要求^[20]。

5 结论

拓扑优化技术这一新兴优化设计方法非常适合于汽车工业中车身整体和单个零件的设计。尽管有一些困难,但世界范围内的汽车业已有大量成功应用的案例,专门的拓扑优化软件现也已相对成熟。目前国内汽车工业的相关研究和应用还不多,因此需要加强这一方面的研究工作,推广拓扑优化技术的使用,从而促进汽车设计水平与国际接轨。

参考文献:

- [1] Bendsoe M P, Kikuchi N. Generating Optimal Topologies in Structure Design Using a Homogenization Method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71: 197 ~ 224.
- [2] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications[J]. Springer, 2003.
- [3] Fukushima J, et. al. Shape and Topology Optimization of a Car Body with Multiple Loading conditions[J]. SAE Technical Paper Series, 1992, 920777: 1 ~ 3.
- [4] 李建红,等. 汽车车身复杂钣金件的拓扑优化设计[J]. 汽车工程, 2003, 25.
- [5] Thomas H, Zhou M, Schramm U. Issues of Commercial Optimization Software Development[J]. Struct Multidisc Optim, 2002, (23): 97 ~ 110.
- [6] Volvo Car Coporation. Industrial Case Studies[Z]. IVS Activities, 2002.

(下转第 89 页)

参考文献:

- [1] 詹金华,陈志良.烟草栽培[M].昆明:云南科技出版社,1998,171~174.
- [2] 许秀成,李萍,王好斌.包裹型缓释/控制释放肥料专题报告(第三报):包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展[J].磷肥和复肥,2001,16(4):4~8.
- [3] Ender MT,Peppsa NA. Transport of Ionizable Drugs and Protein in Cross Linked Poly and Polycarrylic Acid - Cohydroxyethyl Methacrylate Hydro Gels. Diffusion and Release Studies[J]. Journal of Controlled Release,1997,48:47~56.
- [4] 施卫省,王亚民,戈振扬,等.营养元素对烟草产量和品质的影响与对策[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(4):310~312.
- [5]徐和昌,柯以倪,郭立新,等.几种缓释肥料包膜的性质和分析方法[J].中国农业科学,1994,28(4):72~79.
- [6] 叶佳伟,吕芬,李小明,等.不同施N水平对烤烟经济效益的影响[J].云南农业科技,2004,(2):9~10.

(上接第 81 页)

- [7] Mueller O. Final Report the European Funded Project HIPOP (High Performance Optimization - ESPRIT Contract No. 24462) [Z] 1998.
- [8] Reed C. Applications of OptiStruct Optimization to Body in White Design[J]. Altair Engineering Ltd, 2002.
- [9] Dirschmid F. Optimization of Car Components using MSC/CONSTRUCT[C]. MSC's 1st Worldwide Automotive Conference 1999.
- [10] Binder T, Hougardy P, Haffner P. Optimization of Castings and Forgings at AUDI AG[J]. Simulation - Das Fachmagazin fuer FEM, CFD und M KS, 2003, (2).
- [11] Meske R, Mulfinger F, Warmuth O. Topology and Shape Optimization of Components and Systems with Contact Boundary Condtions[Z]. NAFEMS Seminar: Modeling of Assemblies and Joints for FE Analyses, April 2002.
- [12] Nishiwaki S. Structural Optimization Based on Discrete Elements[J]. R & D Review of Toyota CRDL, 2002, 37(1).
- [13] HPCN - TTN Network. Optimisation in Automotive Engineering - How Parallel Computing Can Save Ressources [Z]. European Commission.
- [14] Bangert C. Introduction to the TOSCA Software[Z]. FE - DESIGN Technical Semainr, Beijing: April, 2004.
- [15] Soto C A. Strctural Topology Optimization: from Minimizing Compliance to Maximizing Energy Absorption[J]. International Journal of Vehicle Design, 2001, 25(1/2): 142~163.
- [16] Mayer R R. The Application of Topological Optimization Techniques To Nonlinear Structural Problems Using Variable Material Densities[J]. Optimization in Industry, 1999, 2: 243~251.
- [17] Volkswagen A. G. Topology Optimization of an Engine Mount Bracket Using Altair OptiStruct [Z]. Volkswagen A. G, 2003.
- [18] Meyer - Pruessner R. The Topology Optimization at Volkswagen and its Introduction in the Process of Engine Development[J]. Proc. OptiCON, 1999.
- [19] Jones D R. Optimization in the Automotive Industry[J]. Optimization and Industry, 2001.
- [20] Noack J. Topology Optimization with Casting and Machining Restrictions by the Example of Brake Parts[C]. 21th CAD - FEM Users' Meeting 2003.