



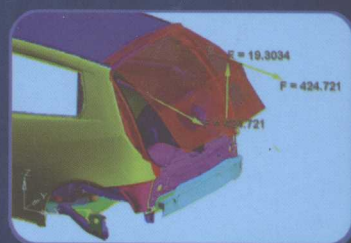
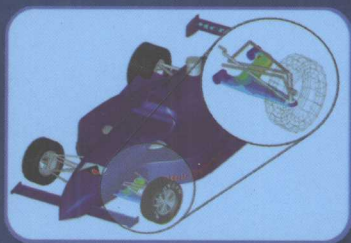
21世纪高等学校教材

普通高等教育“十一五”汽车类专业(方向)规划教材

HYPHERWORKS

# 基于HyperWorks 的结构优化设计技术

张胜兰 郑冬黎 郝琪 李楚琳 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

TH122  
Z163.1

21 世纪高等学校教材

普通高等教育“十一五”汽车类专业（方向）规划教材

# 基于 HyperWorks 的 结构优化设计技术

张胜兰 郑冬黎 郝 琪 李楚琳 编著  
罗永革 主审

机械工业出版社

本书主要介绍有限元分析及结构优化设计技术的基本概念、优化分析方法和过程。

本书分上、下两篇。上篇主要介绍 HyperWorks 有限元前、后处理技术,包括 HyperMesh 入门、几何清理、网格划分、网格质量检查、有限元分析模型的建立、HyperMesh 后处理及 HyperView 简介等内容;下篇主要介绍 HyperWorks 的结构优化技术,包括 OptiStruct 概述、拓扑优化、形貌优化、形状优化以及尺寸优化技术。

为了方便读者学习和掌握各章节内容,本书在内容编排上注重以典型示例带动相关内容的学习,并在各章节设置了思考题。本书的示例与思考题中所用的模型文件,读者可通过机械工业出版社网站 <http://www.cmpedu.com> 下载,也可以通过 E-mail 向作者索取。

本书为 Altair 中国公司认可的 HyperWorks 软件培训用书,可作为高等学校车辆工程及相关专业的有限元分析和优化设计教材,或 CAE 入门人员的自学和培训教材,也可供汽车、航空航天、重装备、国防、消费品等行业的工程技术人员参考。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

基于 HyperWorks 的结构优化设计技术/张胜兰等编著. 北京:机械工业出版社, 2007. 10

21 世纪高等学校教材. 普通高等教育“十一五”汽车类专业(方向)规划教材

ISBN 978 - 7 - 111 - 22552 - 2

I. 基… II. 张… III. 机械设计: 结构设计—最优设计—应用软件, HyperWorks—高等学校—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 159247 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 赵爱宁 尹法欣 版式设计: 霍永明 责任校对: 肖琳

封面设计: 王伟光 责任印制: 王书来

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2007 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.75 印张 · 463 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 22552 - 2

定价: 29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379712 88379217

封面防伪标均为盗版

普通高等教育汽车类专业 (方向)  
教材编审委员会

|      |          |     |
|------|----------|-----|
| 主任:  | 北京理工大学   | 林逸  |
| 副主任: | 黑龙江工程学院  | 齐晓杰 |
|      | 湖北汽车工业学院 | 陶健民 |
|      | 扬州大学     | 陈靖芯 |
|      | 西华大学     | 黄海波 |
|      | 机械工业出版社  | 邓海平 |
| 委员:  | 吉林大学     | 方泳龙 |
|      | 吉林大学     | 刘玉梅 |
|      | 北京航空航天大学 | 高峰  |
|      | 同济大学     | 陈永革 |
|      | 上海交通大学   | 喻凡  |
|      | 上海大学     | 何忱予 |
|      | 哈尔滨理工大学  | 徐雳  |
|      | 武汉理工大学   | 张国方 |
|      | 山东理工大学   | 邹广德 |
|      | 山东交通学院   | 李祥贵 |
|      | 燕山大学     | 韩宗奇 |
|      | 长沙理工大学   | 张新  |
|      | 青岛理工大学   | 卢燕  |
|      | 河南科技大学   | 张文春 |
|      | 南京工程学院   | 贺曙新 |
|      | 淮阴工学院    | 刘远伟 |
| 秘书:  | 机械工业出版社  | 赵爱宁 |
|      | 机械工业出版社  | 冯春生 |

# 序

汽车被称为“改变世界的机器”。由于汽车工业具有很强的产业关联度，因而被视为一个国家经济发展水平的重要标志。近10年来，我国汽车工业快速而稳步发展，汽车产量年均增长15%，是同期世界汽车产量增长量的10倍。汽车工业正在成为拉动我国经济增长的发动机。汽车工业的繁荣，使汽车及其相关产业的人才需求量大幅度增长。与此相应地，作为人才培养主要基地的汽车工业高等教育也得到了长足发展。据不完全统计，迄今全国开办汽车类专业的高等院校已达百余所。

从未来发展趋势看，打造我国自主品牌、开发核心技术是我国汽车工业的必然选择，但当前我国汽车工业还处在以技术引进、加工制造为主的阶段，这就要求在人才培养时既要具有前瞻性，又要与我国实际情况相结合。要在注重培养具有自主开发能力的研究型人才的同时，大力培养知识、能力、素质结构具有鲜明的“理论基础扎实，专业知识面广，实践能力强，综合素质高，有较强的科技运用、推广、转换能力”特点的应用型人才。这也意味着对我国高等教育的办学体制、机制、模式和人才培养理念等提出了全新的要求。

为了满足新形势下对汽车类高等工程技术人才培养的需求，在中国机械工业教育协会机械工程及自动化学科教学委员会车辆工程学科组的领导下，成立了教材编审委员会，组织制定了多个系列的普通高等教育规划教材。其中，为了解决高等教育应用型人才培养中教材短缺、滞后等问题，组织编写了“普通高等教育‘十一五’汽车类专业（方向）规划教材”。

本系列教材在学科体系上适应普通高等院校培养应用型人才的需求；在内容上注重介绍新技术和新工艺，强调实用性和工程概念，减少理论推导；在教学上强调加强实践环节。此外，本系列教材将力求做到：

1) 全面性。目前本系列教材包括汽车设计与制造、汽车运用与维修、汽车服务工程、物流工程等专业方向，今后还将扩展其他专业领域，更全面地涵盖汽车类专业方向。

2) 完整性。对于每一个专业方向的系列教材，今后还将继续根据行业变化对教学提出的要求填平补齐，使之更加完善。

3) 优质性。在教材编审委员会的领导下，继续优化每一本教材的规划、编审、出版和修订过程，让教材的生产过程逐步实现优质和高效。

4) 服务性。根据需要，为教材配备CAI课件和教学辅助教材，召开新教材

讲习班，在相应网站开设研讨专栏等。

相信本系列教材的出版将对我国汽车类专业的高等教育产生积极的影响，为我国汽车行业应用型人才培养模式作出有益的探索。由于我国汽车工业还处于快速发展阶段，对人才不断提出新的要求，这也就决定了高等教育的人才培养模式和教材建设也处于不断变革之中。我们衷心希望更多的高等院校加入本系列教材建设的队伍中来，使教材体系更加完善，以更好地为高等教育培养汽车专业人才服务。

中国汽车工程学会 常务理事  
中国机械工业教育  
协会车辆工程学科组 副主任  
林 逸

# 序 言

计算机辅助设计 (CAD) 和计算机辅助工程 (CAE) 技术是现代设计的必备工具, 在国内外企业中得到了越来越多的应用。然而, 虽然现有的 CAD 和 CAE 技术应用已经在很大程度上改变了传统的设计理念, 虚拟仿真已经取代了一部分传统的试验, 大大缩短了设计周期, 降低了设计成本, 但是并未能突破传统经验的束缚, 实现真正意义上的创新设计。

1993 年, 一项具有创新意义的产品设计技术“概念优化设计技术”问世, 其商业化工具 OptiStruct 随后被集成到 Altair 公司著名的 HyperWorks 系统中。该技术在 1994 年获得了《Industry Week》杂志“年度创新技术”大奖。在此后十多年的应用中, 从空中客车 A380、波音 787 这样的庞然大物到手机芯片、硬盘指针这类微型结构, 从发动机、车架这类制造业核心产品到洗发水包装瓶、运动鞋这类日常产品, 数以千计的产品实现了前所未有的创新设计。

我国在“十一五”计划中将自主创新作为重大的国策之一, 结构优化设计技术必将得到越来越多的应用。为了实现这个目标, 在大学教材建设上, 我们应该注意学习和引进国际的先进技术和先进理念, 实现与企业需求的融合。此书无疑可以为汽车、机械、航空航天和力学等专业的本科高年级学生或研究生提供接触国际先进设计理念的机会和相关知识, 并帮助其熟悉专业的计算机应用软件工具, 以应对未来的挑战。

林俊

2007 年 5 月

## 前 言

优化设计是将设计问题的物理模型转化为数学模型，运用最优化数学理论，选用适当的优化方法，并借助计算机求解该数学模型，从而得出最佳设计方案的一种设计方法。随着 CAE 技术日趋成熟，各种数值仿真方法在产品设计中得到大量的应用。

传统的产品设计流程是一个人工反复进行设计的过程。随着 CAE 技术中一个非常重要的组成部分——结构优化技术发展成熟并成功地应用于产品的设计，它以其天生的优势正在改变着传统的设计流程。在概念设计阶段，优化技术可以把产品所需性能全部考虑进来，在给定的设计空间下找到最佳的产品设计思路；在虚拟试验阶段发现问题后，优化技术可以直接给出产品改进的方案，而不仅是对产品进行校核，从而真正帮助设计师设计出创新而可靠的产品。这种全新的产品设计过程，就是优化驱动的产品设计过程 ODDP (Optimization Driven Design Process)。美国澳汰尔 (Altair) 工程软件有限公司的 HyperWorks 软件是实现 ODDP 的先行者。它为用户提供优秀的前处理工具 HyperMesh，用于实现结构优化设计的 OptiStruct 技术以及全面而通用的 CAE 后处理环境 HyperView。除此之外，它还提供鲁棒性研究、集成的制造工艺仿真、流程自动化和数据管理等方面的支持，集成了设计与分析所需的各种工具，逐渐成为以数据和流程为核心的 CAE 创新平台，在汽车、航空航天、重装备、国防、消费品、石油天然气以及生命和地球科学等行业得到广泛的应用。

HyperWorks8.0 是澳汰尔工程软件有限公司于 2006 年 10 月正式发布的最新版本，它为产品生命周期管理 PLM (Product Lifecycle Management) 的应用提供功能完备的仿真技术套件。该版本提供高度集成的多学科仿真工程平台，大幅度提高仿真效率，可以帮助制造企业更快地开发出创新的产品，使得 CAE 真正成为产品设计过程的核心技术。它在界面风格及操作上较以往版本有较大的变化，操作更为简单、快捷，使用户更容易学习和掌握。

随着三维 CAD 技术的广泛应用，传统的优化设计方法在零件三维模型的结构优化面前显得力不从心。基于有限元法的结构优化技术的杰出载体——HyperWorks 软件的出现给这项工作带来了转机。在澳汰尔工程软件有限公司的 HyperWorks 软件来到中国不久，我院即与该公司建立联系，成立了“HyperWorks 软件应用培训中心”，并在毕业班学生中开设“HyperWorks 在汽车工程中的应用”选修课程。总结几年的教学和实践经验，编写一本“基于 HyperWorks 的结构优化



设计技术”的教材，是我们的一个愿望。HyperWorks 软件最新版本 8.0 的发布促成了这个愿望的实现。

本书主要基于 HyperWorks 8.0 软件介绍有限元分析及结构优化设计技术的基本概念、优化分析方法和过程。全书分绪论、上篇和下篇。绪论部分介绍优化驱动的设计流程，并通过实例介绍 OptiStruct 结构优化设计过程，简单概述 HyperWorks 软件功能及有限元分析步骤。上篇主要介绍 HyperWorks 有限元前后处理技术 HyperMesh 以及 HyperView，包括 HyperMesh 入门、几何清理、网格划分、网格质量检查、有限元分析模型的建立、HyperMesh 后处理及 HyperView 简介等内容。下篇主要介绍 HyperWorks 的结构优化技术，包括用于概念设计阶段的拓扑优化、形貌优化技术，用于详细设计阶段的形状优化、尺寸优化技术。为了方便读者学习和掌握各章节内容，本书在内容编排上注重以典型示例带动相关内容的学习，并在各章节设置思考题。本书的附录提供 HyperWorks 软件的安装以及 CAE 分析中常用的计量单位。

由于内容多而篇幅有限，同时为了适应教学要求及 CAE 入门的自学者，本书没有以 HyperWorks 软件功能的全面性和系统性讲解为主导，而是以分析方法和过程为主线，将多种功能通过示例进行展示。建议读者参照各章中提供的示例步骤边学、边练、边思考，并适时利用 HyperWorks 软件的在线帮助功能，这样将有助于对书中内容的掌握。各章均附有思考题，对教学和自学会有很大帮助。另外，随本书一起出版的《HyperWorks 分析应用实例》介绍各种分析及优化应用实例，有助于掌握有限元分析技术、结构优化技术，并全面提高分析和应用能力。

本书的示例与思考题中所用的模型文件，读者可通过机械工业出版社网站 <http://www.cmpedu.com> 下载，也可通过 E-mail 向作者索取。书中示例中打开的文件如无特别说明，即为下载文件中的同名文件。

本书为 Altair 中国公司认可的 HyperWorks 软件培训用书。澳汰尔工程软件中国（上海）有限公司在 HyperWorks 应用上给予我校的教学工作以极大的支持，并为我们编写本书提供了丰富的资料。编者在此对澳汰尔工程软件中国（上海）有限公司给予的支持和帮助表示衷心的感谢！

在本书编写过程中，得到湖北汽车工业学院教材科、陶健民副院长、汽车系罗永革主任的大力支持，也得到叶洎沅先生的帮助和指导。胡运康老先生通读了全稿，在用词造句方面提出了不少建议。在此，谨对他们的帮助表示敬意和感谢！

本书绪论、下篇及附录 A 由张胜兰编写，上篇及附录 B 由郑冬黎、郝琪、李楚琳编写。全书由张胜兰统稿，由罗永革任主审。

由于作者水平有限，虽经反复琢磨，书中错误和不足之处仍在所难免，敬请专家和广大读者不吝指正，也欢迎读者来信共同探讨。联系方式：[slzhang10@163.com](mailto:slzhang10@163.com)。

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 序                     |    |
| 序言                    |    |
| 前言                    |    |
| 绪论                    | 1  |
| 第一节 优化驱动的设计过程         | 1  |
| 第二节 HyperWorks 软件功能简介 | 4  |
| 第三节 有限元法的基本思想与分析步骤    | 7  |
| 思考题                   | 10 |

## 上篇 有限元前、后处理技术 ——HyperMesh

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第一章 HyperMesh 入门   | 13  |
| 第一节 HyperMesh 概述   | 13  |
| 第二节 用户环境及文件操作      | 15  |
| 第三节 面板菜单的使用        | 17  |
| 第四节 模型的组织管理        | 21  |
| 第五节 显示控制           | 23  |
| 第六节 HyperMesh 入门示例 | 27  |
| 思考题                | 42  |
| 第二章 几何清理           | 44  |
| 第一节 CAD 模型的导入与修复   | 44  |
| 第二节 创建中面           | 53  |
| 第三节 几何模型的简化        | 56  |
| 第四节 改善几何模型的拓扑结构    | 60  |
| 思考题                | 66  |
| 第三章 网格划分           | 68  |
| 第一节 一维单元的划分        | 68  |
| 第二节 二维单元网格划分       | 79  |
| 第三节 三维单元网格划分       | 90  |
| 思考题                | 105 |
| 第四章 网格质量检查         | 107 |

# 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第一节 网格质量的检查与编辑                  | 107 |
| 第二节 质量指标 (QI) 对单元质量的评价与优化       | 117 |
| 思考题                             | 124 |
| 第五章 有限元分析模型的建立                  | 125 |
| 第一节 求解器的输入文件格式与卡片               | 125 |
| 第二节 创建边界条件                      | 133 |
| 思考题                             | 142 |
| 第六章 HyperMesh 后处理及 HyperView 简介 | 143 |
| 第一节 HyperMesh 后处理功能简介           | 143 |
| 第二节 专业的后处理平台——HyperView         | 146 |
| 思考题                             | 156 |

## 下篇 结构优化设计基础 ——OptiStruct

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第七章 OptiStruct 概述        | 159 |
| 第一节 OptiStruct 结构优化方法简介  | 159 |
| 第二节 OptiStruct 优化设计的数学基础 | 160 |
| 第三节 OptiStruct 结构响应      | 163 |
| 第四节 OptiStruct 结构优化设计流程  | 168 |
| 思考题                      | 169 |
| 第八章 拓扑优化                 | 170 |
| 第一节 拓扑优化概述               | 170 |
| 第二节 制造工艺约束               | 173 |
| 第三节 拓扑优化示例               | 183 |
| 思考题                      | 211 |
| 第九章 形貌优化                 | 213 |
| 第一节 形貌优化概述               | 213 |

|                         |            |                                  |            |
|-------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| 第二节 形貌优化示例 .....        | 218        | 第一节 尺寸优化概述 .....                 | 260        |
| 思考题 .....               | 226        | 第二节 尺寸优化示例 .....                 | 262        |
| <b>第十章 形状优化</b> .....   | <b>228</b> | 思考题 .....                        | 276        |
| 第一节 HyperMorph 简介 ..... | 228        | <b>附录 A HyperWorks 的安装</b> ..... | <b>278</b> |
| 第二节 形状优化概述 .....        | 232        | <b>附录 B CAE 分析中常用的计量</b>         |            |
| 第三节 形状优化示例 .....        | 234        | 单位 .....                         | 285        |
| 思考题 .....               | 258        | <b>参考文献</b> .....                | <b>286</b> |
| <b>第十一章 尺寸优化</b> .....  | <b>260</b> |                                  |            |

# 绪论

## 第一节 优化驱动的设计过程

### 1. 产品设计流程的变化

传统的产品设计流程是一个人工反复进行设计的过程。工程师借助 CAD 工具进行产品的设计,接着提交工厂进行加工制造,然后对产品进行实物试验。如果产品不能满足功能要求或者失效,就需要对产品进行设计进行修改,甚至重新设计,如此反复,直到产品在实物试验中满足全部要求为止。传统的产品设计流程如图 0-1 所示。这是一个周期长、耗费高的过程,已经完全不能满足现代产品设计的要求。

昨天……



图 0-1 传统的产品设计流程

随着计算机软硬件技术的发展,CAE 技术日趋成熟,各种数值仿真方法,如有限元、多体动力学、计算流体力学等技术,在产品设计中得到大量的应用。产品在完成初步设计后,可以基于 CAD 模型进行产品性能的虚拟试验,初步检验其工作应力、运动过程、产品寿命等。如果产品不能满足要求,可以立即返回给设计人员进行修改或重新设计,从而大大缩短实物试验周期和降低费用,如图 0-2 所示。

今天……

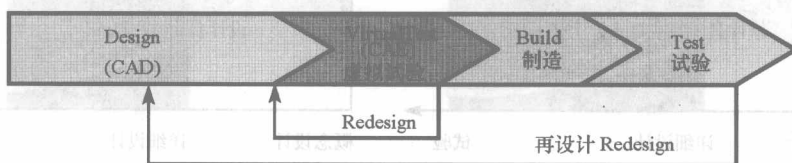


图 0-2 CAE 技术改进了传统的产品设计流程

### 2. 优化驱动的产品设计过程

当今众多企业广泛应用的 CAE 技术存在局限性,表现在于它仍然仅被用作在产品后期对设计方案的校核。如果在这一阶段发现了问题,设计者已经没有足够的自由度对结构进行全面的改进,所能做的仅仅是局部的调整并希望这种调整不会造成别的问题。问题产生的根源在于,在设计的前期,即拥有最大的设计自由度的概念设计阶段,设计者所能凭借的

完全是经验和想象力，很难同时对产品的所有性能精确地予以考虑，并且往往由于经验所限，不能给出创新性的设计。最有效的 CAE 技术似乎从来无法在这个阶段帮助设计者。

现在，CAE 技术中一个非常重要的组成部分——结构优化技术已经发展成熟并成功地被用于产品设计，它以天生的优势正在改变传统的产品设计流程。在概念设计阶段，优化技术可以对产品所需性能全部予以考虑，在给定的设计空间下找到最佳的产品设计思路；在虚拟试验阶段发现问题后，优化技术可以直接给出产品改进的方案，而不仅是对产品进行校核，从而真正帮助设计工程师设计出创新和可靠的产品。这种全新的产品设计过程，就是优化驱动的产品设计过程 ODDP (Optimization Driven Design Process)，如图 0-3 所示。

正在发生的改变……

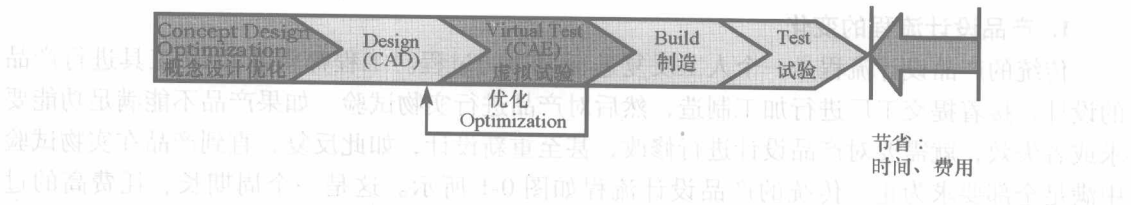


图 0-3 优化驱动的产品设计流程

可见，优化驱动的产品设计过程给了产品设计工程师最有效的设计帮助，在概念设计这个决定 80% 最终产品成本的关键阶段，在产品改进这个耗时、费力的重复阶段，提供了革命性的解决方案，从而大大节省时间和费用，提高产品性能和投放市场的速度。如图 0-4 所示，优化驱动的产品设计过程在概念设计阶段提供概念设计优化，在详细设计阶段提供尺寸和形状优化，极大地改善了传统产品设计流程中概念设计阶段具有最大设计自由度而知识最少、详细设计阶段具有丰富的产品知识但设计自由度很小的局面，为创新性设计提供了保证。

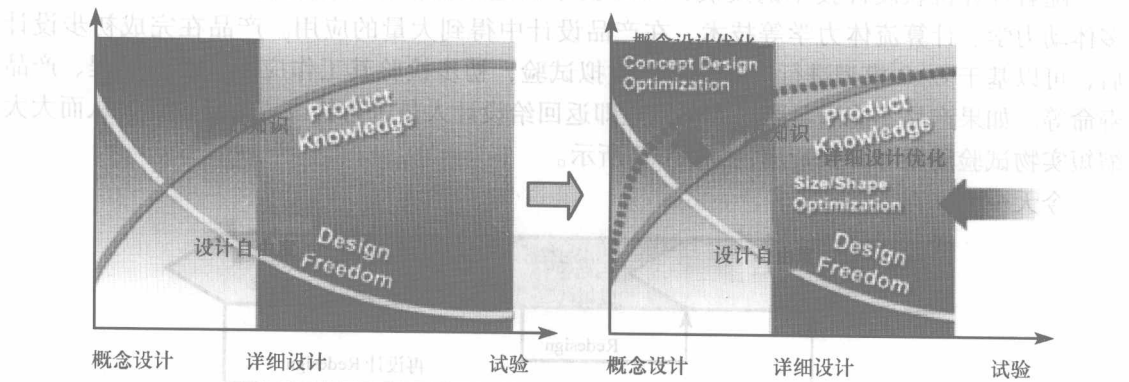


图 0-4 优化技术在产品设计过程中的作用

### 3. Altair OptiStruct 结构优化技术

目前，世界上已有多个商用结构优化求解器，其中，Altair OptiStruct 结构优化求解器以其成熟、全面的技术得到大家的认可，已被广泛应用于许多行业的产品设计实践中。

OptiStruct 提供拓扑优化、形貌优化、尺寸优化、形状优化以及自由尺寸和自由形状优化技术。通过在产品设计的各个阶段灵活运用各种结构优化技术，OptiStruct 将成为创新产

品设计的驱动者。

以北美汽车钢铁联盟（由三大汽车公司和七家钢铁公司组成）委托 Altair 公司完成的一研究项目为例，说明优化驱动的产品设计过程。该项目的目标是以福特汽车公司一款非常成功的钢材料 SUV 车架为原型，在不改变材料且不牺牲任何刚度的前提下实现该车架的轻量化设计。最终全新设计的车架与原型相比，减重 23%，弯曲刚度略有提高，扭转刚度提高 30%，如图 0-5 所示。值得一提的是，由于在优化设计过程中充分考虑了制造加工方面的要求，新型车架的制造成本远低于采用铝合金材料所需花费的高额成本。

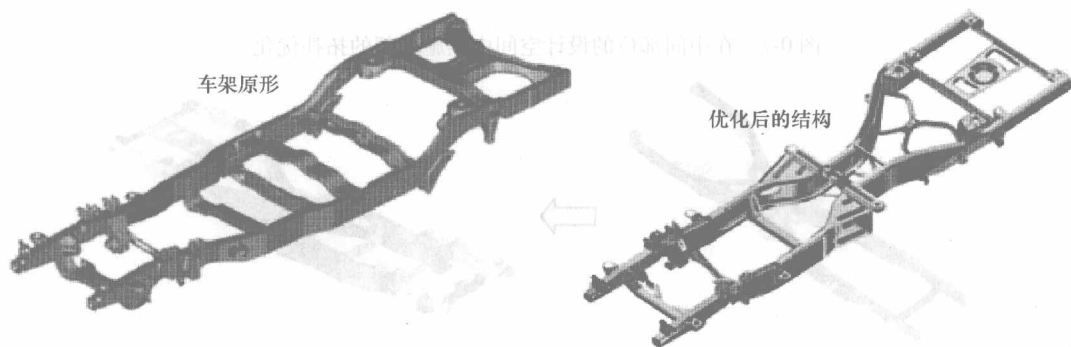


图 0-5 福特 SUV 车架原型与优化设计后的结构对比

SUV 车架的整个优化设计，经历了整体拓扑优化、局部拓扑优化和详细设计优化过程。

(1) 整体拓扑优化 建立概念设计模型，定义封闭的设计空间，在给定边界条件下通过拓扑优化技术寻找出在该优化空间中的最佳材料布局。这一过程如图 0-6 所示。

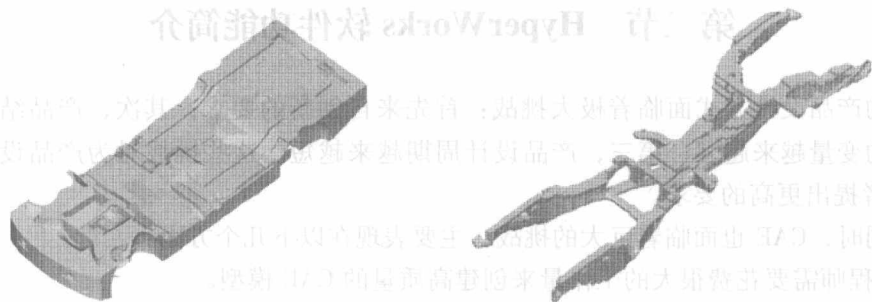


图 0-6 从初始封闭的设计空间寻找最佳的材料布局

(2) 局部拓扑优化 由第一步得出的材料布局可以获得大体的结构设计思路，但在车架中部的材料分布不够清晰，因此在第二步设计中采用局部拓扑优化技术，将该部位的设计空间重新定义再次进行拓扑优化设计。这一过程如图 0-7 所示。

(3) 详细设计优化 由以上两步获得清晰的材料布局，现在设计师可以根据这一思路并结合制造工艺技术设计一款全新的车架，并进行最终尺寸和形状的优化。这一过程如图 0-8 所示。

从上述设计过程可以看出，OptiStruct 结构优化技术驱动了整个新型车架的设计，是车架创新设计的灵魂。由于这种新的设计手段在设计一开始就实现最优设计，避免在设计的前期阶段过多的反复，从而产品设计周期大为缩短。此外更重要的是，优化设计本身可以帮助

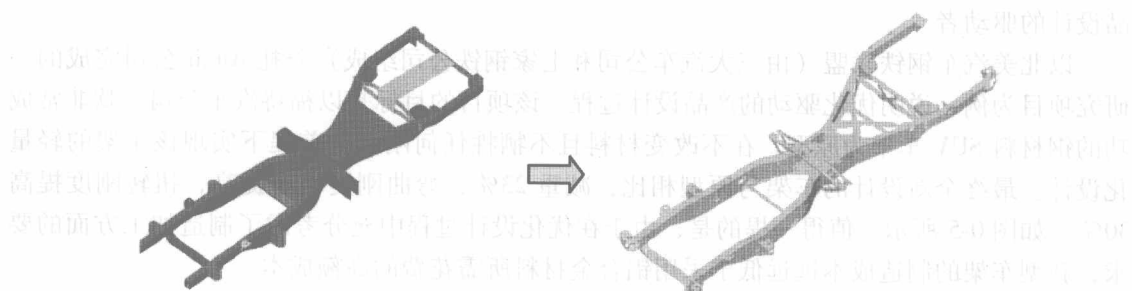


图 0-7 在中间部位的设计空间中实施局部的拓扑优化

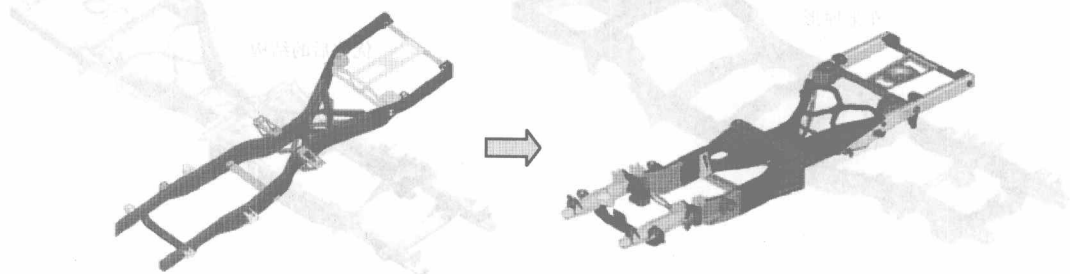


图 0-8 以优化设计给出的设计方案为基础进行细节设计和优化

设计师寻找到质量更轻同时性能更好的设计方案，所以在追求轻量化设计和自主创新的今天，采用 OptiStruct 结构优化技术更具有非常重要的意义。

## 第二节 HyperWorks 软件功能简介

当前的产品设计方式面临着极大挑战：首先来自创新的要求；其次，产品结构日趋复杂，设计的变量越来越多；第三，产品设计周期越来越短。这些挑战对为产品设计服务的 CAE 工作者提出更高的要求。

与此同时，CAE 也面临着巨大的挑战，主要表现在以下几个方面：

- 1) 工程师需要花费很大的工作量来创建高质量的 CAE 模型。
- 2) CAE 模型的规模快速增长，如一辆整车，以前用 20 万个单元，现在国内平均做到 70 万~80 万个单元，而国外已经做到千万级的网格单元。
- 3) CAE 在国内绝大部分企业仍然被用于产品设计后期的验证，而国外已经真正实现 CAE 驱动产品设计。
- 4) CAE 环境缺乏统一性，从而浪费了巨大的资源。

为了应对上述挑战，美国 Altair 公司为用户提供了功能全面的 CAE 创新平台 Altair HyperWorks。它为用户提供：一流的前、后处理技术，大幅度提高 CAE 工程师的工作效率；杰出的概念设计工具，真正让企业实现 CAE 驱动创新设计；优秀的流程自动化和标准化开发环境，帮助提高 CAE 的工作效率和质量；高度开放而集成的 CAE 数据管理系统，在提高数据安全性和工作效率的同时，真正将专家知识纳入企业的知识体系；先进的标准分析求解器，利用具有专利的 HyperWorks Unit 体系真正提升企业在 CAE 方面投资的性价比，从而节约了成本。

HyperWorks 是一个创新、开放的企业级 CAE 平台，它集成设计与分析所需各种工具，具有强大的性能以及高度的开放性、灵活性和友好的用户界面，具有五大类解决方案，共 18 大模块，以满足 CAE 技术发展的未来趋势。

### 1. 优化设计和鲁棒性研究

(1) OptiStruct 是以有限元法为基础的结构优化设计工具，提供全面的拓扑、形貌、形状、尺寸等优化解决方案，并在全球首先引入制造工艺约束，取得了大量成功案例。图 0-9 所示为发动机支架优化前后的模型，优化后的结构在保持原有刚度的情况下，质量减轻了 20%。图 0-10 所示为油底壳的原始模型和经过形貌优化后的模型，优化后的第一阶模态频率从 60Hz 提高到 300Hz。图 0-11 所示为牵引器支架经过局部的形状优化，最大应力从 403MPa 减小到 337MPa，同时消除了局部应力集中现象。图 0-12 所示为轿车的车架经过尺寸优化后，其低阶模态频率均得到提高。

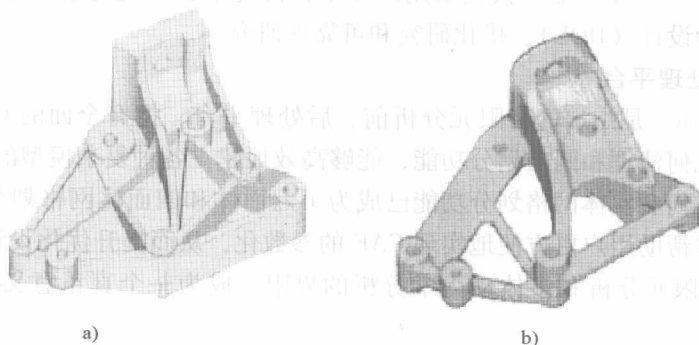


图 0-9 发动机支架的拓扑优化

a) 优化前 b) 优化后

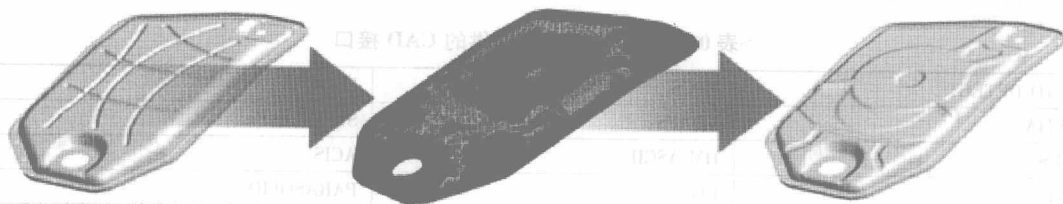


图 0-10 油底壳的形貌优化

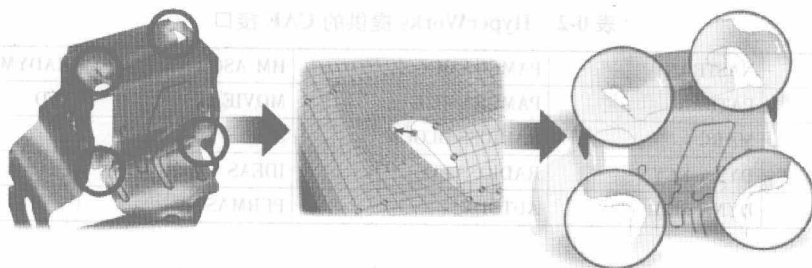


图 0-11 牵引器支架的形状优化



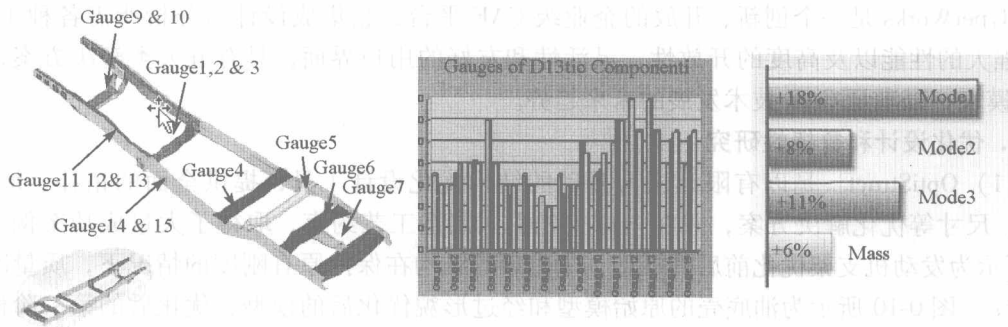


图 0-12 轿车车架的尺寸优化

(2) HyperStudy 是功能强大且易用的多学科优化平台, 支持独立于求解器的模型参数化, 可用于试验设计 (DOE)、优化研究和可靠性研究。

## 2. CAE 前后处理平台

(1) HyperMesh 是杰出的有限元分析前、后处理平台, 拥有全面的 CAD 和 CAE 求解器接口、强大的几何清理和网格划分功能, 能够高效地建立各种复杂模型的有限元和有限差分模型, 其实体几何和实体网格划分功能已成为了六面体和四面体网格划分功能的新标准。Morphing 技术能够帮助用户更方便地实现 CAE 的参数化, 从而提升优化设计的能力。此外, HyperMesh 突破有限元分析和多体动力学分析的界限, 成为一个真正意义上通用的前处理平台。

Altair HyperWorks 的内核可以与所有主流的商业 CAD 系统和 CAE 求解器协同工作, 构建一个统一的工程环境。

HyperWorks 提供的 CAD 图形接口见表 0-1。

表 0-1 HyperWorks 提供的 CAD 接口

|             |          |           |
|-------------|----------|-----------|
| AUTO-DETECT | PDGS     | PROE      |
| CATIA       | VDAFS    | STEP      |
| IGES        | HM ASCII | ACIS      |
| DXF         | UG       | PARASOLID |

HyperWorks 提供的 CAE 接口见表 0-2。

表 0-2 HyperWorks 提供的 CAE 接口

|            |          |               |          |        |
|------------|----------|---------------|----------|--------|
| OPTISTRUCT | NASTRAN  | PAMCRASH      | HM ASCII | MADYMO |
| ABAQUS     | PATRAN   | PAMCRASH2G    | MOVIE    | CFD    |
| ANSYS      | MARC     | RADIOSS BLOCK | STL      |        |
| CMOLD      | DYNA KEY | RADIOSS FIX   | IDEAS    |        |
| MOLDFLOW   | DYNA SEQ | AUTODV        | PERMAS   |        |

(2) HyperView HyperView 及其集成的 HyperGraph 模块是通用的 CAE 后处理环境, 为 CAE 和试验结果的专业后处理提供支持。HyperView 是 FEA (有限元分析) 和 MBD (多体动力学) 的仿真后处理平台, 拥有全面的求解器接口、杰出的图形驱动和强大的数据处