



国家卓越工程师教育培养计划
——装甲车辆工程专业系列教材



An Introduction to
Mechanical
Optimization Design

机械结构

优化设计

姚寿文 主编

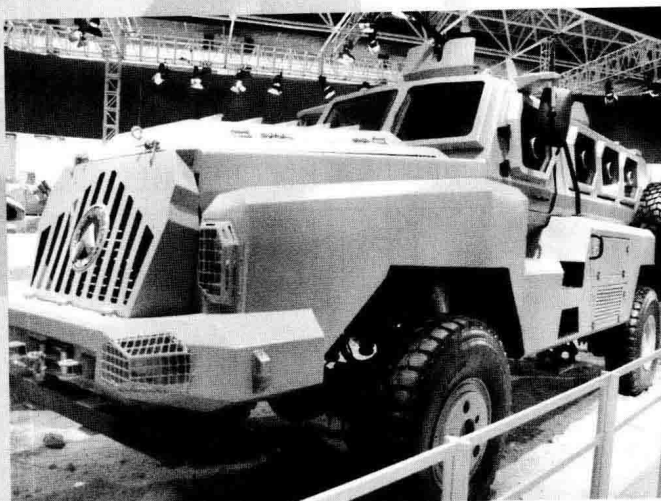


北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家卓越工程师教育培养计划
——装甲车辆工程专业系列教材



An Introduction to
Mechanical
Optimization Design

机械结构

优化设计

姚寿文 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

机械结构优化设计 / 姚寿文主编. —北京: 北京理工大学出版社,
2015. 9

ISBN 978 - 7 - 5640 - 9751 - 6

I. ①机… II. ①姚… III. ①机械设计-结构设计-最优设计-高等学校-教材 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 211768 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 15.25

彩 插 / 4

字 数 / 270 千字

版 次 / 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 35.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

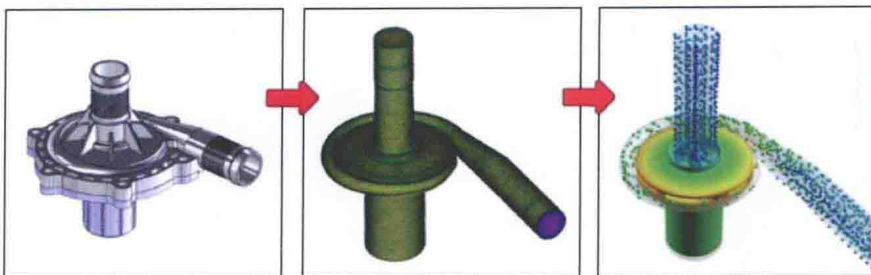


图 8.1 基于 AcuSolve 的新型水泵设计

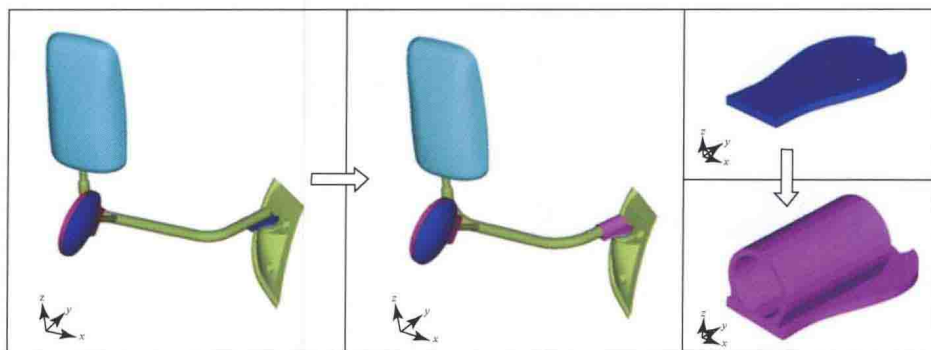


图 8.2 基于 RADIOSS 的后视角强度优化

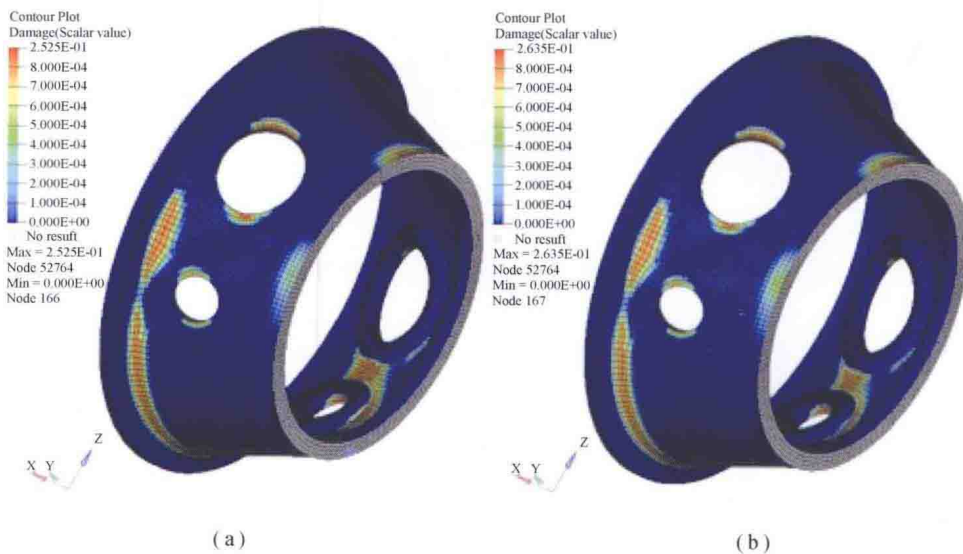


图 8.3 基于 Hyperworks 的电机组发电机主轴综合强度分析
由 Hyperworks 自动进行雨流计数和线性损伤累积，并使用 Hyperview 进行后处理
(a) 考虑重力载荷；(b) 不考虑重力载荷

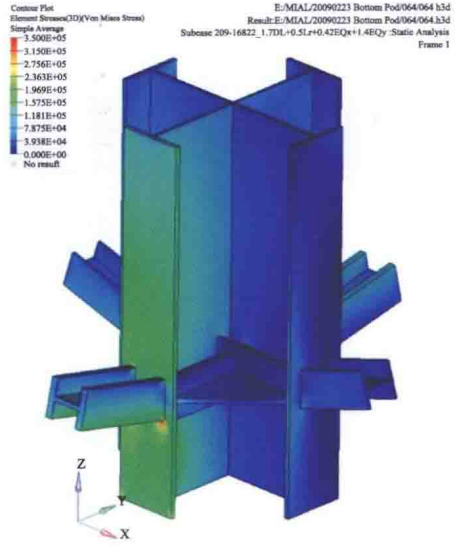


图 8.4 基于 Optistruct 的航站楼立柱设计

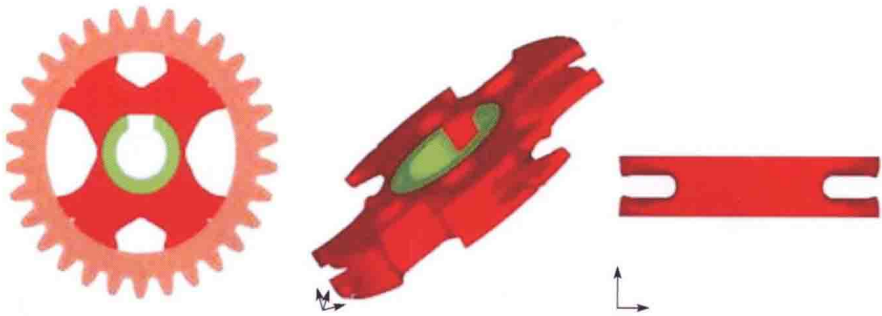


图 8.5 在厚度方向和垂直方向施加三面对称约束的拓扑优化结果

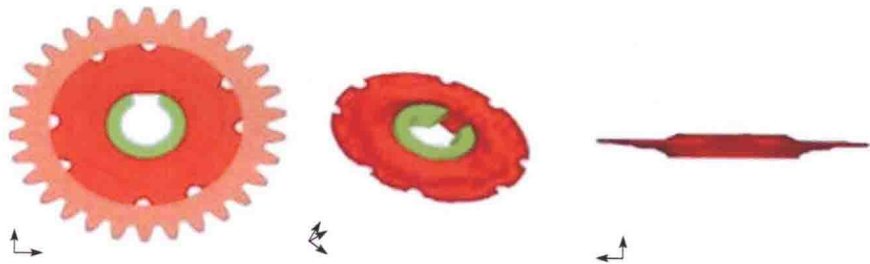


图 8.6 周向循环对称约束的拓扑优化结果

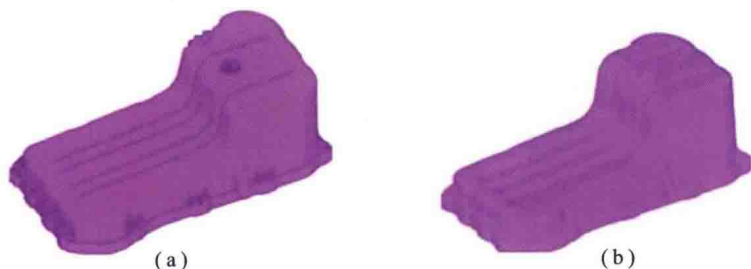


图 8.7 运用形貌优化优化商用车油底壳
(a) 原始方案；(b) 优化方案

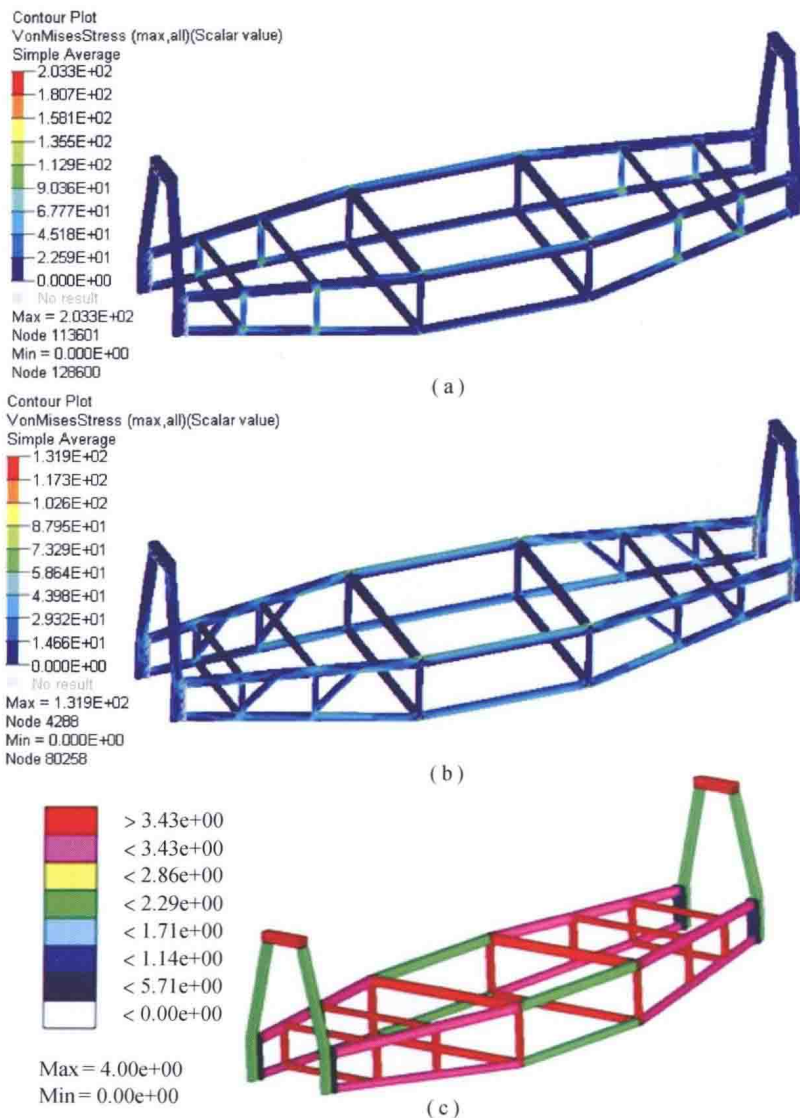


图 8.8 基于尺寸优化的某整车试验台架结构优化设计
(a) 优化前应力分布结果；(b) 优化后应力分布结果；(c) 优化后梁的厚度分布结果

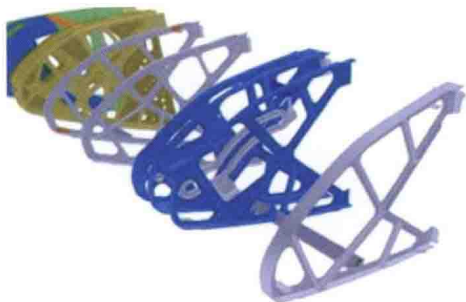


图 8.9 波音 787 机翼前缘结构优化设计

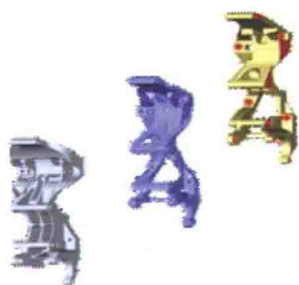


图 8.10 德国大众对支架的优化设计



图 8.11 “牵牛星”登月车概念设计

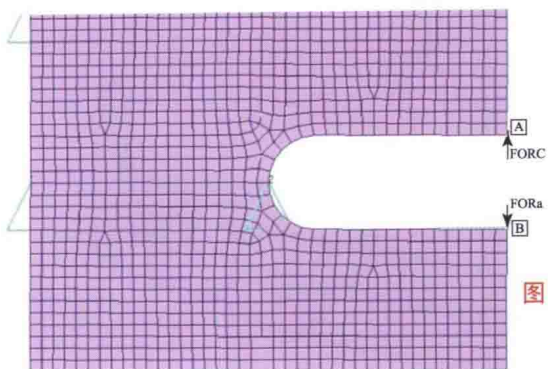


图 9.1 二维拓扑优化有限元模型

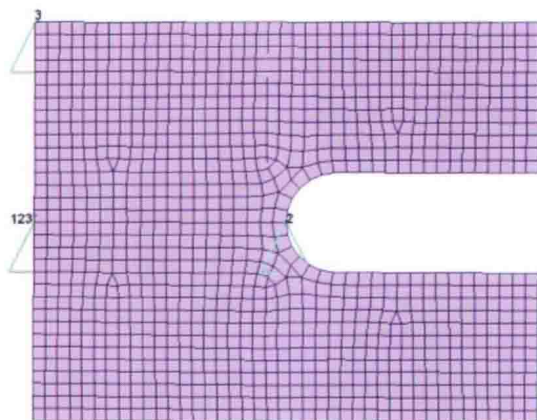


图 9.3 约束定义

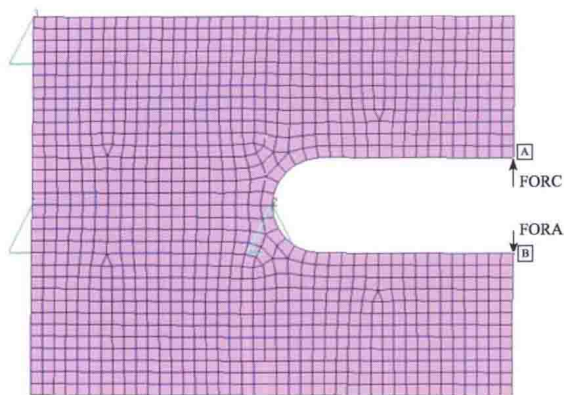


图 9.4 载荷定义

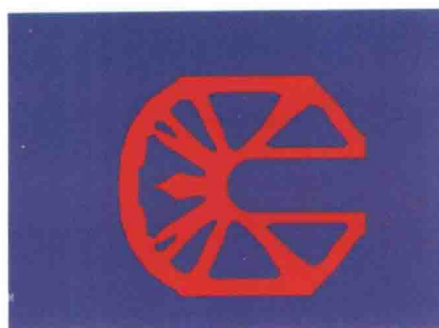


图 9.8 拓扑优化材料分布云图

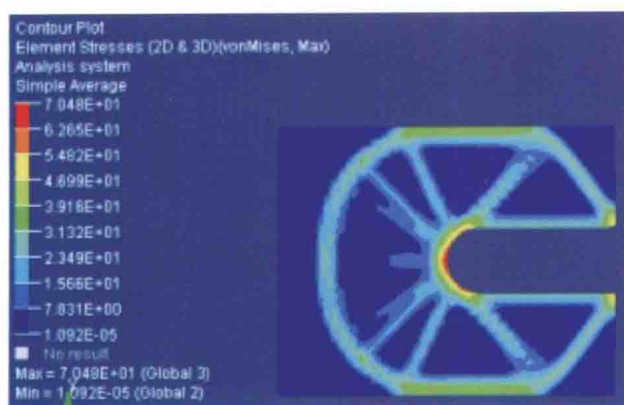


图 9.9 优化后结构应力云图

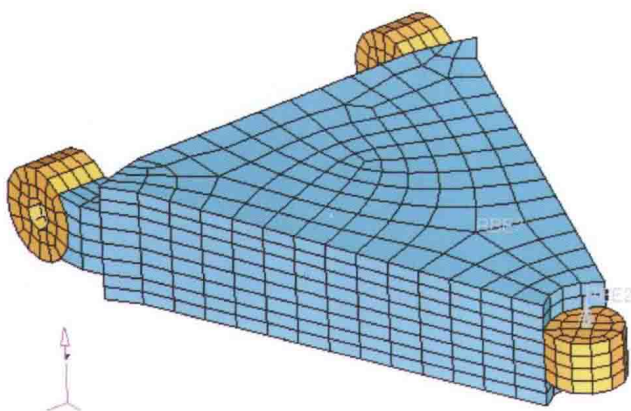


图 9.10 三维体单元拓扑优化

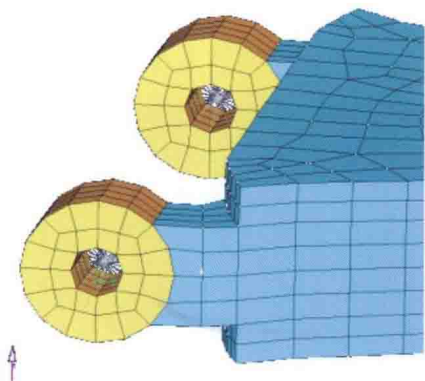


图 9.11 创建约束

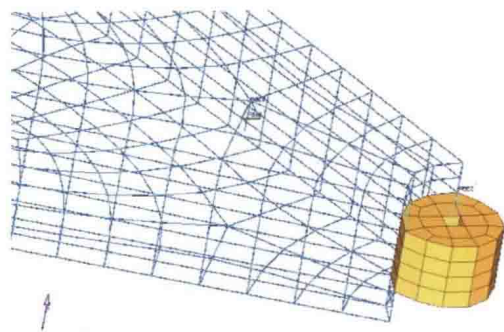


图 9.12 结点 3239 载荷添加

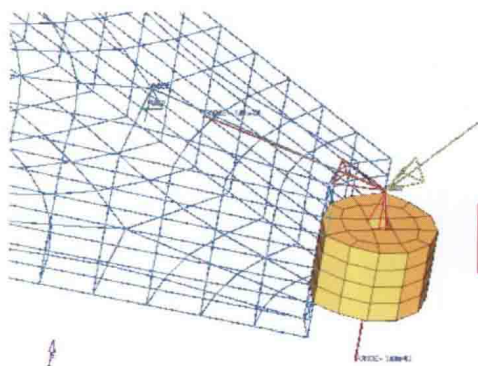


图 9.13 载荷添加示意图

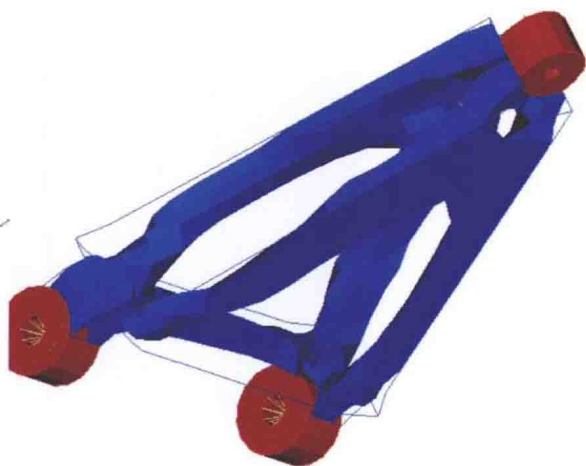


图 9.14 拓扑优化结果

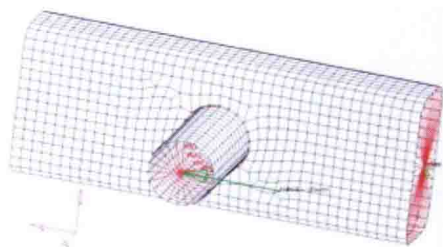


图 10.1 接头优化

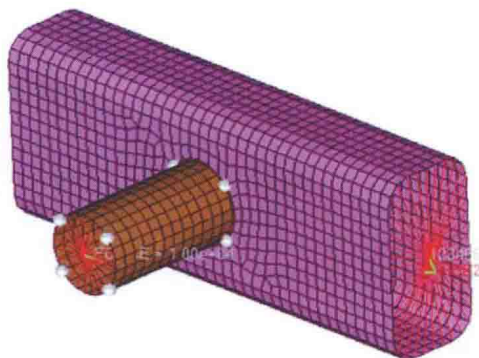


图 10.2 接点选择

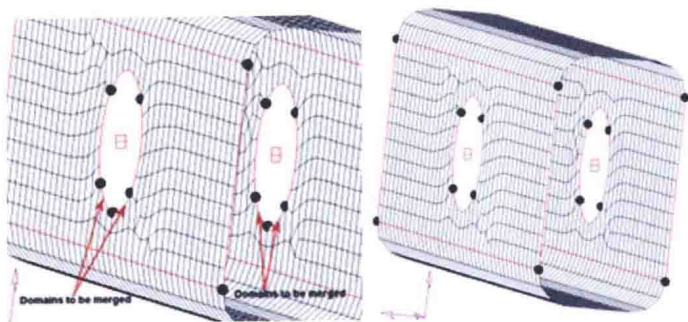


图 10.3 边界区域合并

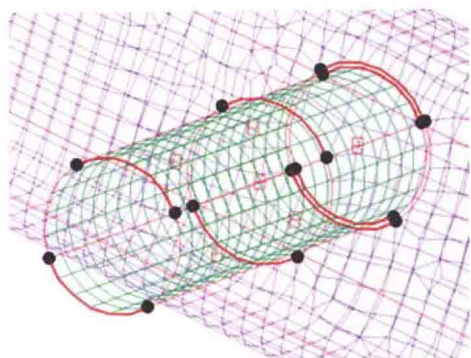


图 10.4 边界选取

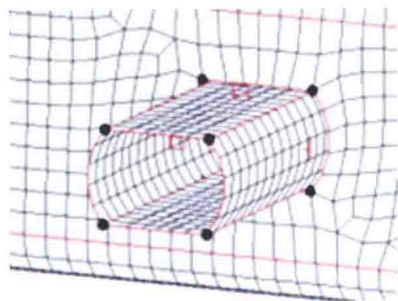


图 10.5 新的曲率应用在选择的边界上

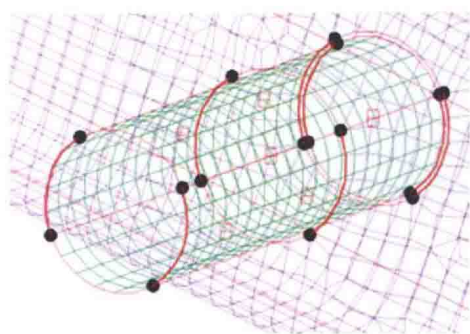


图 10.6 边界选取

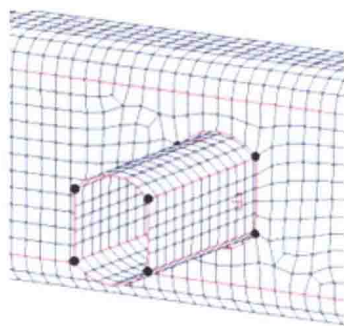


图 10.7 形状改变

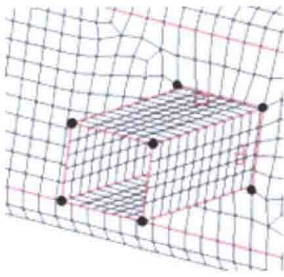


图 10.8 设计形状的改变图

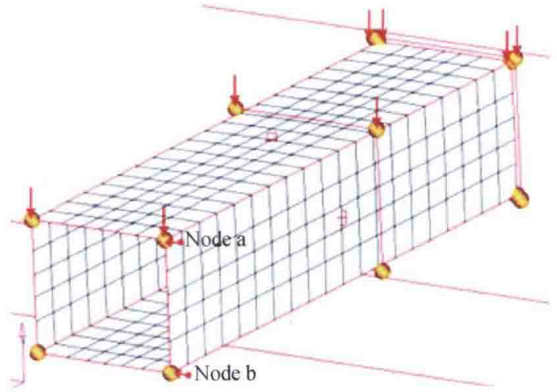


图 10.9 边界接点选择图

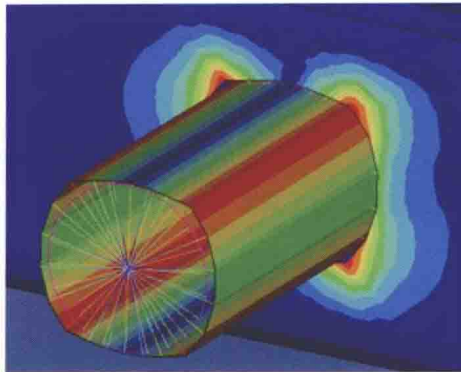


图 10.11 形状优化结果

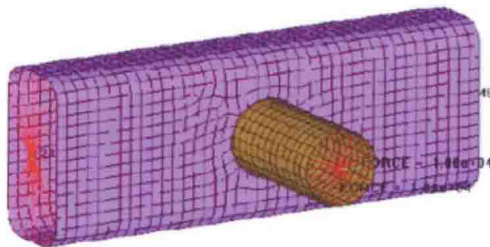


图 10.12 尺寸优化模型

前 言

机械结构优化设计（本书也简称为结构优化设计）是一种现代设计理论和方法。它是优化理论和方法在机械设计领域的应用。本书主要围绕结构优化设计中的三种基本分类，即尺寸优化、形状优化（形状优化由于涉及结构边界的复杂数学描述，本书不作详细介绍）和拓扑优化，进行问题的描述以及求解，并主要集中在线弹性体的离散结构（桁架）和有限元离散的平面连续体两大方面。

本教材要求学生具有一定高等数学、线性代数、固体力学和结构力学知识，尤其是有限元的基础知识。由于学时较少，为使全书有较好的体系，便于广大学生自学，在教材的内容上安排了 A~E 五个附录，补充教材中涉及的一些基础知识和必备知识。

本教材按三大部分进行组织。第 1 部分包含第 1 章到第 7 章，主要为结构优化的一些理论、方法。第 1 章介绍了结构优化设计的基本思想，三种结构优化的定义以及一些专用概念和专门术语。第 2 章结合几个小型优化问题进行了基本过程的分析，让学生熟悉基本流程。第 3 章以重要的凸问题为对象，介绍了相关的理论和方法。第 4 章从算法的角度，介绍了几种序列显式凸近似方法，并对 CONLIN 和 MMA 给出了较为详细的推导。第 5 章主要以桁架为研究对象，以柔度为优化目标，对尺寸优化进行了详细的讲述。第 6 章主要结合优化分析中常用的敏度分析要求，给出了几种敏度分析方法。第 7 章主要是以连续体为对象，对刚度拓扑优化进行了分析，并将显式凸近似中的优化准则法（OC）进行了推导，讨论了网格依赖性、数值不稳定等问题。第 2 部分包含第 8 章到第 10 章，主要是以目前结构优化商业软件中的 Optistruct 为对象，介绍了该软件的基本功能，并结合尺寸优化、形状优化和拓扑优化进行了实际的操作，使学生基本熟悉应用商业软件解决结构优化问题的基本流程。第 3 部分为 5 个附录，主要补充第 1 部分中涉及的一些数学、有限元等知识，并以程序的形式将一些经典的优化方法进行简单介绍，完善部分学生的知识结构。第 3 部分内容可结合具体情况进

行讲解。

本书适合作为机械类专业高年级本科生、研究生的教材使用，也可供相关研究人员或技术人员参考。

本教材由北京理工大学姚寿文主编并负责统稿，参加编写的还有吕建丽、肖开琴和郑怀宇。其中教材的第2部分由吕建丽编写并整理，附录A、附录D由郑怀宇整理，肖开琴负责第2章的编写和整理。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2014年6月于北京

目 录

第 1 部分 结构优化设计基本理论、方法

第 1 章 概述	3
1.1 结构优化的基本思想	3
1.2 设计过程	4
1.3 结构优化问题的通用数学描述	5
1.4 三种类型的结构优化问题	7
1.5 离散和分布参数系统	9
第 2 章 优化设计数学模型及实例分析	10
2.1 优化设计数学模型	10
2.1.1 设计变量	10
2.1.2 目标函数	11
2.1.3 约束条件	12
2.2 优化问题实例	13
2.2.1 应力约束两杆桁架质量最小	13
2.2.2 应力和稳定约束两杆桁架质量最小	15
2.2.3 应力和位移约束两杆桁架质量最小	17
2.2.4 应力约束三杆桁架质量最小	21
2.2.5 刚度约束三杆桁架质量最小	30
第 3 章 凸规划基本理论	33
3.1 优化设计问题的极值	33
3.2 局部极值和全局极值	33
3.3 函数的凸性	35
3.4 KKT 条件	38
3.5 拉格朗日对偶法	42
3.5.1 拉格朗日对偶法概述	42
3.5.2 凸且设计变量可分离的拉格朗日对偶法	43
第 4 章 序列显式凸近似方法	51
4.1 嵌套问题的一般求解过程	51
4.2 序列线性规划	52

4.3	序列二次规划方法	53
4.4	凸线性化	53
4.5	移动渐近线法	60
第5章	桁架柔度优化问题	65
5.1	问题描述	65
5.2	嵌套方程及特点	71
5.2.1	嵌套问题的凸性	72
5.2.2	满应力设计	73
5.2.3	柔度约束下体积最小	74
5.3	嵌套方程数值解	77
第6章	敏度分析的基本方法	80
6.1	数值法	80
6.2	解析法	81
6.2.1	直接解析法	81
6.2.2	伴随解析法	82
6.3	虚载荷分析计算方法	83
6.3.1	杆	83
6.3.2	平面薄板	87
第7章	二维连续体拓扑优化	95
7.1	二维弹性体	95
7.2	优化设计问题	97
7.3	变厚度薄板问题	100
7.3.1	问题描述	100
7.3.2	有限元离散	101
7.3.3	优化准则 (OC) 法	102
7.3.4	固体各向同性材料惩罚法 (SIMP)	105
7.4	99行拓扑优化 MATLAB 程序	112
7.4.1	拓扑优化问题	112
7.4.2	MATLAB 程序实现	115
7.4.3	程序功能扩充	117
7.4.4	拓扑优化实验	119

第2部分 结构优化设计专题应用

第8章	Optistruct 简介	123
8.1	Hyperworks 介绍	123

8.2 Optistruct 功能及特点	125
8.2.1 结构设计及优化	126
8.2.2 拓扑优化	127
8.2.3 形貌优化	127
8.2.4 形状优化	128
8.2.5 尺寸优化	128
8.2.6 有限元分析	128
8.2.7 多体动力学分析	129
8.3 Optistruct 结构优化常用模块	131
8.3.1 HyperMesh 界面概述	131
8.3.2 Optistruct 结构优化基本流程	135
第 9 章 结构拓扑优化	141
9.1 二维结构拓扑优化	141
9.2 三维结构拓扑优化	148
第 10 章 形状优化和尺寸优化	155
10.1 形状优化	155
10.2 尺寸优化	164

第 3 部分 附 录

附录 A 矩阵基本运算	171
附录 B 函数的极值条件及搜索方向	177
附录 C 弹性力学问题有限元方法简介	186
附录 D 优化方法的 MATLAB 程序	200
附录 E 拓扑优化 99 行程序	227
习题	231
参考文献	236

第1部分

结构优化设计基本 理论、方法