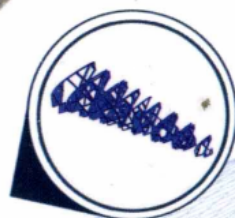
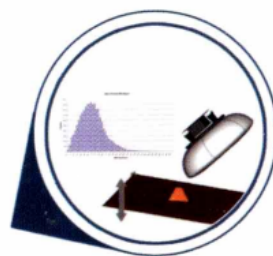
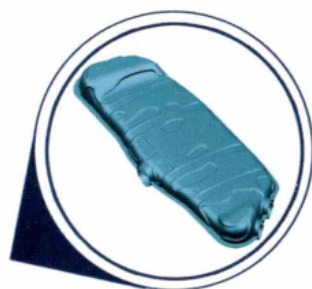
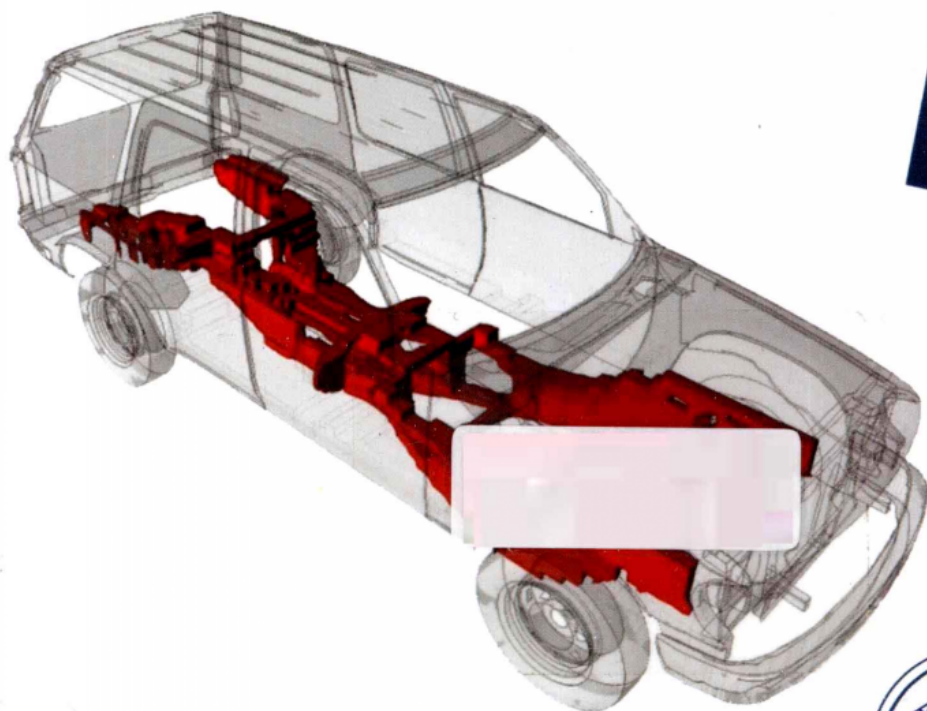


HyperWorks进阶教程系列

OptiStruct & HyperStudy

理论基础与 工程应用

洪清泉 赵康 张攀 等编著



附赠超值 DVD 光盘

- 全书练习实例模型文件+视频讲解
- Altair中国HyperWorks技术大会论文集



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

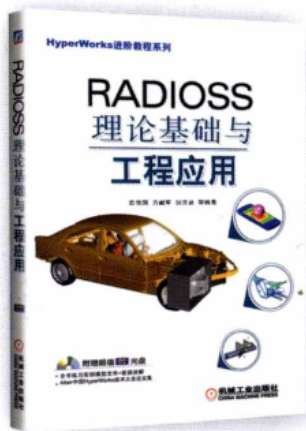
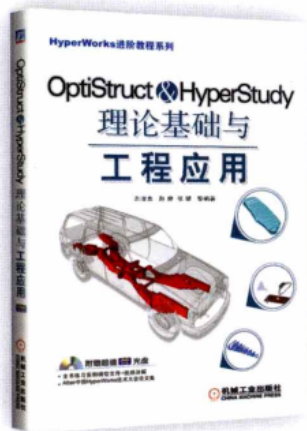
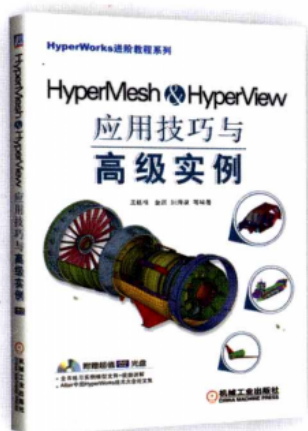
内容简介

本书主要介绍了OptiStruct和HyperStudy的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

全书分上、下两篇。上篇是OptiStruct部分, 主要介绍OptiStruct的基础理论和各种优化技术, 以及部分优化卡片说明, 并提供了大量练习实例和行业工程案例; 下篇是HyperStudy部分, 主要介绍HyperStudy的各种系统研究和优化方法, 并提供了集成不同求解器进行优化设计的大量练习和案例。

本书由Altair中国公司技术团队编写, 是Altair中国公司推荐的HyperWorks软件培训用书, 可作为机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电气及家电等相关行业工程技术人员自学或参考用书, 也可作为理工院校相关专业师生的学习或者教学用书。

HyperWorks进阶教程系列



地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

电话服务

社服务中心: 010-88361066

销售一部: 010-68326294

销售二部: 010-88379649

读者购书热线: 010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计

ISBN 978-7-111-40462-0

策划编辑◎丁诚 张淑谦 / 封面设计◎



Zishi Culture
子时文化

ISBN 978-7-111-40462-0



9 787111 404620 >

定价: 99.00元(含1DVD)

HyperWorks 进阶教程系列

OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用

洪清泉 赵康 张攀 等编著



机械工业出版社

本书主要介绍了 OptiStruct 和 HyperStudy 的理论方法、基础练习、使用技巧和工程应用。

全书分上、下两篇。上篇是 OptiStruct 部分, 主要介绍 OptiStruct 的基础理论和各种优化技术, 以及部分优化卡片说明, 并提供了大量实例练习和行业工程案例; 下篇是 HyperStudy 部分, 主要介绍 HyperStudy 的各种系统研究和优化方法, 并提供了集成不同求解器进行优化设计的大量练习和案例。

本书由 Altair 中国公司技术团队编写, 是 Altair 中国公司推荐的 HyperWorks 软件培训用书, 可作为机械、汽车、航空航天、船舶、军工、重型装备、电子及家电等相关行业工程技术人员的自学或参考用书, 也可作为理工院校相关专业师生学习或者教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用 / 洪清泉等编著. —北京: 机械工业出版社, 2012.12

(HyperWorks 进阶教程系列)

ISBN 978-7-111-40462-0

I. ①O… II. ①洪… III. ①有限元分析—应用软件—教材

IV. ①O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 274969 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 丁 诚 张淑谦

责任编辑: 张淑谦 罗子超 吴超莉 范成欣

责任印制: 杨 曦

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm×260mm · 33.5 印张 · 830 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40462-0

ISBN 978-7-89433-215-8 (光盘)

定价: 99.00 元 (含 1DVD)

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

序 一

Altair 公司于 1985 年从工程咨询起家，在 1989 年发布了 HyperMesh 软件，并很快在汽车业得到广泛认同，从此激发了 Altair 在软件上投入的热情。1994 年，Altair 推出了 OptiStruct 模块，当年即获得《工业周刊》(Industry Week) 年度技术奖。随后的几年，Altair 通过收购和开发，扩展了一系列模块，并于 1999 年整合成 HyperWorks 软件包。在 2006 年收购 RADIOSS 软件后，Altair 终于在结构仿真和优化方面形成了完整的产品系列。

2012 是 Altair 进入中国的第 11 个年头，在这 11 年中，在 Altair 中国同仁的不懈努力下，Altair 中国业务有了长足的发展，HyperWorks 用户群也逐渐壮大。为此，2007 年开始，我们每年举办 HyperWorks 技术大会 (HTC) 暨 Altair 用户年会。在会上，不仅有大会主题发言，还有大量的用户论文交流。2007 年，上海的第一届 HTC 大会就收到了 70 多篇论文，大部分是关于 HyperMesh 的应用。2008 年，在北京的第二届 HTC 大会上开始有一些制造仿真技术 (HyperXtrude/HyperForm) 方面的论文。2009~2010 年，在上海的第三、四届 HTC 大会上论文数都超过了 120 篇，内容涵盖的行业更广，应用的模块更多，涌现了大量的有限元求解、多体动力学仿真 (MotionSolve)、优化设计及二次开发的成功案例。

Altair 早些年的成功基本上得益于好的产品以及技术人员的口口相传。Altair 的业务模式也为 HyperWorks 的普及提供了强有力的支持，使得高端 CAE 的进入门槛大大降低。随着业务的飞速发展，要求使用 HyperWorks 的技术人员也越来越多，大家迫切希望有一些更好的教程，能帮助他们更快地上手、更系统地学习、更深入地应用。在这样的背景下，我们组织编写了 HyperWorks 进阶教程系列：《HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例》、《OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用》、《RADIOSS 理论基础与工程应用》，以满足广大 CAE 工程师及爱好者的要求，并帮助高校学子更快掌握 HyperWorks 的软件应用。

无论您是新入行，还是已在这一行工作多年，您一定会为 CAE 工具的多样化伤透脑筋。HyperWorks 在高端 CAE 技术上提供了一站式解决方案，不仅使系统精简，同时又可同其他系统共享 CAE 模型，更进一步将目前的主流 CAE 求解器集成在统一的环境上，组成一个高效的产品研发平台，从而将创新、成本、效率有机结合起来，构造最有效的产品创新设计平台解决方案。Altair “以用户的成功衡量我们的业绩”的服务理念、不断创新的技术和业务模式、全球工程咨询经验的导入，会助您更上一层楼！

戚国焕
Altair 大中华区总经理

序 二

2000 年以来, 结构优化在工业中的应用取得了迅猛发展。这一趋势受到以下几个因素的驱动。首先, 经过近 40 年的积累, 结构优化和多学科优化技术及其算法越来越成熟。其次, 商业软件在把新兴技术转化为实用工程工具的过程中扮演了重要角色, 特别是拓扑优化技术引领了这一潮流。这是因为产品设计意味着创新性和创造性, 而拓扑优化可以帮助工程师在概念设计早期阶段跳出思维定式。实践证明, 即使在一些工程领域中被认为已经设计得很完美的产品上, 拓扑优化也能生成令人惊叹的高性能设计。通过拓扑优化技术, 空中客车公司在 A380 飞机的前缘翼肋上取得了超过 40% 的减重效果。

Altair 公司极大地推动了优化技术的发展, 并在优化技术成为主流的工程方法和工具的过程中做出了重要贡献。从 1994 年 OptiStruct 问世以来, OptiStruct 就非常重视拓扑优化技术, 并认为它是产品创新设计的革命性工具。在过去 15 年的研发中, OptiStruct 重点关注了以下几个在实际应用中非常重要的方面: (1) 对于概念设计, 必须在优化模型中考虑制造可行性; (2) 工程结构有不同应用, 因此, 软件应该为工程师提供能够表征设计问题的一般方案; (3) 对于复杂的分析模型, 通常包含大量的设计变量和约束, 求解结果的稳健性和效率是关键。

目前, 工程领域中最热门的是复合材料结构设计的变革。它的发展主要源自于航空工业对复合材料设计需求的快速增长。全球航空工业正以空前的步伐建造着下一代飞机, 而新一代飞机机身将全部使用复合材料。复合材料具有强大的设计潜能, 因为层合板材料在整个结构中几乎可以被任意裁剪, 然而增加的设计自由度同时也对设计流程和软件带来了新的挑战。OptiStruct 的复合材料优化技术成功应对了这一挑战。

虽然概念设计阶段的优化是产品设计创新的关键, 但所有的产品都必须经过详细设计才能完成。OptiStruct 为经典的尺寸和形状优化提供了完整的解决方案。OptiStruct 一直致力于创造一个强健、高效并且易用的优化工具。除此之外, 它集成在 HyperWorks 这一全面的 CAE 仿真平台中, 得到了优化模型前处理的最大便利。

此外, 目前工程领域对复杂多学科系统进行研究和优化的需求也日趋强烈, 这已超出了结构优化设计的范畴, 需要新的优化引擎以驱动不同学科领域的仿真分析。HyperStudy 是该领域的主要软件之一, 完全可以胜任现代产品的各种性能优化。

我要感谢本书的作者, 他们承担了这个艰巨的任务——用这本书向工程人员和工科学系统地介绍了优化技术和实践经验。希望这本书能够为那些开始将优化技术应用于日常工程实践的人士带来灵感, 也能够为那些已经熟练掌握优化技术的人士带来更多的专业知识。

周明
Altair 全球副总裁

前 言

技术支持和服务是 Altair 公司的核心竞争力之一。从 2001 年来到中国, Altair 公司就开始建立技术团队, 为客户提供快速而全面的软件售前、售后技术支持, 把 Altair 全球产品创新技术和工程咨询经验带给中国市场。过去的 10 年, 正是 CAE 技术引领国内广大制造业企业进行产品创新设计, 提升产品竞争力的 10 年。Altair 公司恰逢其时, 以其企业级 CAE 驱动创新平台 HyperWorks 助力中国制造业自主创新。Altair 公司见证了许多国内汽车 OEM 厂家的 CAE 队伍从几人到几十人、再到上百人的发展历程; 参与了 HyperWorks 在国内航空航天、电子、船舶、轨道交通、重型机械、军工等行业众多型号和产品上的成功应用; 与各企业、科研院所、高校的 CAE 工程师和学生相互学习, 共同为提高中国 CAE 技术应用水平而努力。

十年弹指一挥间, Altair HyperWorks 软件已从 V5.0 发展到 V11.0, 中国技术团队也已发展到 50 多人。Altair 公司在为客户服务的过程中, 积累了大量的软件技巧和工程经验, 同时也发现许多工程师和学生苦于目前市场上关于 HyperWorks 的中文书籍很少, 只能通过一些有限的渠道进行学习和交流, 因此深感同广大 HyperWorks 使用者和爱好者分享技术和经验的重要性。

2011 年 6 月, Altair HyperWorks V11.0 正式发布, 它包含了众多的新技术和新功能, 为广大用户带来超值的 CAE 技术体验。在 Altair 大中华区总经理戚国焕先生的支持下, 我们决定以 V11.0 为基础, 编写 HyperWorks 进阶教程系列丛书。本书以 HyperWorks 11.0 版本为平台, 介绍了 OptiStruct 和 HyperStudy 这两个模块的基本理论方法及工程应用, 分上、下两篇, 共 18 章。

上篇主要介绍 OptiStruct 结构优化模块, 包括第 1~10 章。第 1 章总体介绍 OptiStruct 结构优化技术的基础理论; 第 2~5 章介绍拓扑优化、形貌优化、尺寸优化和形状优化技术, 并辅以大量实例练习; 第 6 章介绍复合材料优化技术; 第 7 章介绍等效静态载荷 (ESL) 技术; 第 8 章介绍在热、疲劳和非线性优化方面的一些应用; 第 9 章和第 10 章介绍 OptiStruct 在航空航天方面的一些优化案例。

下篇主要介绍 HyperStudy 系统研究及多学科优化模块, 包括第 11~18 章。第 11 章介绍 HyperStudy 的各项技术及其理论方法; 第 12 章提供了大量的 HyperStudy 基础练习; 第 13 章和第 14 章介绍了两个特色技术, 即 HyperMath 和 Excel 的集成; 第 15~17 章介绍了大量基于 Altair 公司求解器, 包括 Radioss、MotionSolve 和 HyperForm 的实例; 第 18 章为 HyperStudy 与其他求解器相结合的技术和应用。

本书主要由洪清泉、赵康、张攀编写。参与编写的还有 Altair 中国公司技术团队成员罗志凡、徐力敏、易俊杰、徐自立、王晨、林德志、罗强、陈锋、李真、杨少彬、刘文文、陆天宇, 在此深表感谢。

由于编者水平有限, 书中错误及不足之处在所难免, 敬请广大读者不吝指正, 也欢迎大家共同探讨, 可发邮件至 info@altair.com.cn 进一步联系。

Altair 中国技术团队

目 录

序一
序二
前言

第 1 章 OptiStruct 概述 1

1.1	Altair 公司简介	2	1.3	性能响应	9
1.2	OptiStruct 优化流程和理论	3	1.3.1	模型响应	10
1.2.1	内部优化流程	4	1.3.2	子工况相关的响应	12
1.2.2	灵敏度分析	4	1.3.3	函数响应	15
1.2.3	近似模型拟合	5	1.3.4	外部响应	15
1.2.4	寻优策略	6	1.4	OptiStruct 优化卡片和参数	15
1.2.5	收敛准则	6	1.5	操作系统平台及性能	18
1.2.6	全局搜索功能	6	1.6	OptiStruct 运行参数设置	20
1.2.7	约束屏蔽	7	1.7	小结	23
1.2.8	域及其作用	8			

第 2 章 拓扑优化技术实例 24

2.1	拓扑优化技术简介	25	2.5	实例：使用 CWELD 单元进行 焊点拓扑优化	70
2.1.1	单元密度	25	2.6	实例：利用 DMIG 进行模型 缩减的拓扑优化	73
2.1.2	制造工艺约束	25	2.7	实例：矩形板的频率响应 优化	82
2.1.3	OSSmooth 模块介绍	30	2.8	拓扑优化卡片	97
2.2	实例：C 形夹结构的概念 设计	31	2.9	小结	105
2.3	实例：利用加强筋提高汽车 挡板的固有频率	45			
2.4	实例：汽车控制臂的概念 设计	55			

第 3 章 形貌优化技术实例 106

3.1 实例：受扭平板的形貌	优化 120
3.2 实例：利用拓扑和形貌联合	3.4 形貌优化卡片简介 127
3.3 实例：汽车安全带牵引器支架形貌	3.5 autobead 模块简介 133
	3.6 小结 133

第 4 章 尺寸优化技术实例 134

4.1 实例：支架的尺寸优化 135	4.5.1 DESVAR 卡片 162
4.2 实例：碎纸机的尺寸优化 143	4.5.2 DDVAL 卡片 163
4.3 实例：飞机翼肋的自由尺寸	4.5.3 DVPREL1 卡片 164
4.4 实例：集成外部函数的尺寸	4.5.4 DVPREL2 卡片 166
4.5 尺寸优化卡片 162	4.5.5 DEQATN 卡片 168
	4.6 小结 169

第 5 章 形状优化技术 170

5.1 实例：考虑结构屈曲的钢轨形状	5.4 形状优化卡片 186
5.2 实例：带制造工艺约束的自由	5.4.1 DSHAPE 卡片 186
5.3 实例：基于全局搜索算法的筋	5.4.2 DVGRID 卡片 189
5.4 形状优化卡片 186	5.5 小结 190

第 6 章 复合材料优化技术 191

6.1 HyperWorks 复合材料仿真	6.2 实例：复合材料自行车车架
6.1.1 复合材料建模技术 192	6.3 实例：飞机水平尾翼优化 202
6.1.2 复合材料分析求解技术 193	6.4 小结 222
6.1.3 复合材料结构优化和减重技术 ... 194	

第 7 章 等效静态载荷法 223

7.1	等效静态载荷法简介	224
7.2	利用等效静态载荷进行结构 动态优化	225
7.3	实例：四连杆机构的形状 优化	226

7.4	实例：挖掘机工作臂的拓扑 优化	235
7.5	小结	241

第 8 章 热、疲劳及非线性优化实例 242

8.1	实例：电子器件的热传导 优化	243
8.2	实例：连杆的疲劳特性优化	247

8.3	实例：保险杠的碰撞性能 优化	259
8.4	小结	270

第 9 章 航空行业优化实例 271

9.1	实例：舱门连接铰链拓扑 优化	272
9.2	实例：舱门横梁拓扑优化与 尺寸优化	284

9.3	实例：舱门横梁自由尺寸优化与 尺寸优化	295
9.4	实例：机身整体结构尺寸优化	304
9.5	小结	321

第 10 章 航天行业优化实例 322

10.1	实例：导弹结构的自由形状 优化	323
------	--------------------------	-----

10.2	实例：卫星盖板的形貌优化	330
10.3	小结	335

第 11 章 HyperStudy 简介 336

11.1	试验设计	337
11.1.1	试验设计之目的	337
11.1.2	HyperStudy 试验设计类型	337
11.1.3	全因子设计	337
11.1.4	部分因子设计	339

11.1.5	中心复合设计 (CCD)	339
11.1.6	Box-Behnken 设计	340
11.1.7	Plackett-Burman 设计	340
11.1.8	拉丁超立方采样	340
11.1.9	哈默斯雷采样	341

11.1.10	用户自定义设计 (User Define)	341
11.1.11	设计矩阵 (Run Matrix)	342
11.1.12	试验设计后处理	342
11.2	近似模型	343
11.2.1	最小二乘法 (LSR)	344
11.2.2	移动最小二乘法 (MLSM) ...	345
11.2.3	HyperKriging	348
11.2.4	数据统计分析	349
11.3	优化方法	350
11.3.1	自适应响应面法 (ARSM) ...	351
11.3.2	可行方向法 (MFD)	352
11.3.3	序列二次规划 (SQP)	353
11.3.4	遗传算法 (GA)	353
11.3.5	基于可靠性评估的序列优化 方法 (SORA)	355
11.3.6	基于 ARSM 的 SORA	355
11.3.7	多目标遗传算法 (MOGA) ...	355
11.3.8	基于梯度的多目标优化 方法 (GMMO)	356
11.4	随机性研究	356
11.4.1	为什么需要随机性研究	356
11.4.2	统计分布	356
11.4.3	采样	358
11.4.4	相关性	359
11.4.5	后处理数据分析	359
11.5	小结	362

第 12 章 HyperStudy 基础练习 363

12.1	实例：基于 Templex 的优化 分析	364
12.2	实例：基于 Templex 的 DOE 分析	366
12.3	实例：通过参数化 Bulk 文件 进行尺寸优化	369
12.4	实例：通过 HyperMesh 进入 尺寸优化	374
12.5	实例：通过参数化 Block 文件 进行尺寸优化	378
12.6	实例：碰撞分析的可靠性 优化	385
12.7	实例：多学科优化研究	387
12.8	小结	393

第 13 章 HyperMath 集成优化技术实例 394

13.1	实例：在 HyperStudy 中 调用 HyperMath 求解器 进行优化	395
13.2	实例：在 HyperStudy 中注册 HyperMath 函数进行优化	399
13.3	小结	402

第 14 章 Excel 集成优化技术实例 403

14.1	实例：提取 Excel 表格数据 进行研究	404
14.2	实例：关联 Excel 表格数据 进行优化设计	407

14.3	实例：基于 Excel 表格进行 多目标优化	412
14.4	实例：起落架支撑梁的尺寸	

	优化	414
14.5	小结	417

第 15 章 RADIOSS 集成优化技术实例 418

15.1	实例：撞击分析的优化设计 ...	419
15.2	实例：材料模型参数标定	432

15.3	实例：多目标形状优化	439
15.4	小结	448

第 16 章 MotionSolve 集成优化实例 449

16.1	实例：车辆悬架的试验设计 ...	450
16.2	实例：车辆悬架的优化分析 ...	458

16.3	小结	461
------	----------	-----

第 17 章 HyperForm 集成优化实例..... 462

17.1	实例：基于 HyperMesh 界面的 冲压零件形状优化	463
17.2	实例：基于 HyperForm 界面的 冲压零件形状优化	468

17.3	实例：冲压零件的工艺和形状 优化	472
17.4	小结	476

第 18 章 其他求解器集成优化实例 477

18.1	实例：集成 LS-Dyna 的尺寸 优化	478
18.2	实例：集成 ANSYS 的形状 优化	484
18.3	实例：集成 Abaqus 的形状 优化	489
18.4	实例：集成 Madymo 的 DOE	

	分析	494
18.5	实例：集成 FLUENT 的 DOE 分析和优化研究	502
18.6	实例：集成 AcuSolve 的 DOE 分析	516
18.7	小结	524

第 1 章

OptiStruct 概述



结构优化技术是当前 CAE 技术发展的一个热点，在学术研究领域，变密度法、均匀化法、水平集法以及各种准则法等百家争鸣。相关商业软件的开发速度也很快，除了 Altair OptiStruct 外，市场上较知名的软件还有德国 FE-DESIGN 公司的 Tosca、日本 Quint 公司的 OptiShape 以及美国 MSC 公司的 Nastran 等。

结构优化技术在工业界的应用也逐渐成熟。从行业角度来讲，从早期的汽车零部件轻量化设计和飞机机身机翼的板、杆、梁及蒙皮尺寸优化，迅速发展到汽车、飞机和船舶的结构布局优化，电子产品的结构件及连接优化，建筑物和土木工程的结构布置等。从性能角度来讲，早期主要是考虑金属零部件的线性静态和模态性能指标，如应力、应变、位移、频率等，现在已经拓展到金属和复合材料零部件的振动噪声性能、碰撞安全性能、疲劳性能、动态激励下的性能指标等。

本章重点知识

- 1.1 Altair 公司简介
- 1.2 OptiStruct 优化流程和理论
- 1.3 性能响应
- 1.4 OptiStruct 优化卡片和参数
- 1.5 操作系统平台及性能
- 1.6 OptiStruct 运行参数设置
- 1.7 小结

1.1 Altair 公司简介

OptiStruct 是美国 Altair 公司的旗舰产品。Altair 公司是世界领先的工程设计技术的开发者之一，也是一家具有全球深厚工程技术底蕴的优秀 CAE 工程公司。Altair 公司拥有多元化的业务主线，其技术涵盖高端 CAE 仿真和优化技术、数据管理及流程自动化、高性能计算与网络计算技术，同时具备一流的产品设计、流程定制、二次开发等咨询服务能力。Altair 公司的主要软件产品线有以下几类。

- HyperWorks 是较为完整的 CAE 建模、可视化、有限元分析、结构优化和过程自动化等领域的软件产品，始终站在技术的最前沿，为全球的客户提供先进的产品工程方案，引领着工程技术的世界潮流，其涵盖丰富的产品模块如下。
- ✓ HyperMesh: 是目前顶级的 CAE 前处理工具之一，可以快速建立高质量的 CAE 分析模型。
- ✓ Hyperview: 是目前图形驱动速度较快的 CAE 仿真和试验数据的后处理可视化环境。
- ✓ HyperCrash: 是碰撞安全性分析的 CAE 前处理工具。
- ✓ HyperGraph 2D/HyperGraph 3D: 是海量仿真或试验数据处理工具。
- ✓ OptiStruct: 是一个面向产品设计、分析和优化的有限元和结构优化求解器，拥有全球先进的优化技术，提供全面的优化方法。
- ✓ HyperStudy: 是一个开放的多学科优化平台，以其强大的优化引擎调用各类求解器，实现多参数、多学科全面优化。
- ✓ RADIOSS: 是快速、精确和稳健的有限元结构分析软件，能够进行多种线性和非线性分析，广泛用于汽车，航空航天等机械设计领域。
- ✓ AcuSolve: 是领先的、通用的、基于有限元的计算流体动力学软件。AcuSolve 无需求解过程的迭代，也不用担心网格质量和拓扑关系，可以快速得到高质量仿真结果。流固耦合功能可以提供有效的复杂问题多物理场分析能力。
- ✓ MotionView: 是通用的机械系统仿真前后处理软件，同时也是图形可视化工具，它拥有业界领先的柔体技术。
- ✓ MotionSolve: 是多体机械系统动态运动求解器，它支持运动学求解、静力求解、准静态求解、结构动力求解、线性化、特征值分析和状态矩阵输出。
- ✓ HyperForm: 是金属钣金冲压成型和液压成型的仿真工具。
- ✓ HyperXtrude: 是一款三维金属挤压成型仿真软件。
- ✓ SolidThinking: 是工业设计三维造型解决方案。它拥有自由三维建模功能、完整历史进程、可视化界面及快速的实时渲染功能，应用于建筑、汽车、电子设备、珠宝、产品包装及游艇等多种领域，能帮助设计师轻松、快速、低成本地发明、探讨和评估新的设计想法。
- ✓ Inspired: 利用物理学原理，模拟自然规律和过程，获得基于特定环境而形成的形态与结构，能帮助设计师和建筑师进一步激发创意，完成同时满足结构与美学需求的设计。

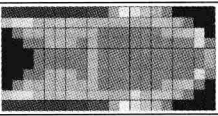
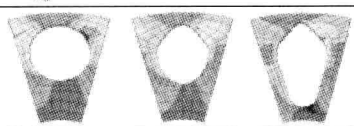
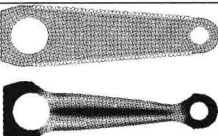
➤ Altair 企业级解决方案。

- ✓ **HyperWorks Enterprise (HWE)**: 产品性能数据管理, 通过 HWE 系统的实施, 建立一个以数据管理为中心的综合系统。它可以实现企业仿真资源的管理, 包括模型资源、流程模板资源; 实现数据权限分级管理, 数据使用的时间监控, 企业的知识管理, 分析项目管理。通过数据管理系统和应用软件、流程自动化软件的集成, 实现数据的无缝流转。
- ✓ **Process Manager (PM)**: 是一个流程自动化工具的开发平台。该平台具有 HWE 数据管理系统进行无缝接口的能力。PM 将使用各种 CAX 的 API 与设计及分析 CAX 软件进行集成, 设计及分析所需要及产生的数据将由 ADM 系统提供和存储。
- ✓ **PBSWorks**: 是全球市场占有率最大的高性能网格计算和资源管理平台, 帮助制造业用户在实现 CAE 仿真的同时, 按照需求有效管理和利用企业的计算资源及网络环境。

1.2 OptiStruct 优化流程和理论

OptiStruct 是一款功能强大的结构优化软件, 覆盖金属和复合材料, 静态和动态, 线性和非线性优化应用领域, 支持全面的优化类型, 包括概念设计阶段的拓扑优化、形貌优化和自由尺寸优化, 以及详细设计阶段的尺寸优化、形状优化和自由形状优化, 如表 1-1 所示。

表 1-1 OptiStruct 结构优化类型

优化类型	说明	示例
拓扑优化 (Topology Optimization)	在给定的设计空间内找到最优的材料分布	
形貌优化 (Topography Optimization)	在钣金件上找出最佳的加强筋位置和形状	
自由尺寸优化 (Free Sizing Optimization)	找出板壳结构上每个区域 (单元) 的最佳厚度, 可用于最新的复合材料优化	
尺寸优化 (Size Optimization)	尺寸和参数优化, 如优化梁的截面尺寸等	
形状优化 (Shape Optimization)	直接基于有限元网格优化产品的位置和几何形状	
自由形状优化 (Free Shape Optimization)	自动确定选定区域的最佳结构形状	

1.2.1 内部优化流程

优化设计有三要素，即设计变量、目标函数和约束条件。设计变量是发生改变从而提高性能的一组参数；目标函数要求最优的设计性能，是关于设计变量的函数；约束条件是对设计的限制，是对设计变量和其他性能的要求。

优化数学模型可表述为

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } f(X) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Subject to: } g(X) &\leq 0 \quad j=1, \dots, m \\ h_k(X) &\leq 0 \quad k=1, \dots, m_h \\ X_i^L &\leq X_i \leq X_i^U \quad i=1, \dots, n \end{aligned}$$

其中， $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是设计变量，如产品的结构尺寸等； $f(X)$ 是设计目标，如各种力学性能或者重量； $g(X)$ 和 $h(X)$ 是需要进行约束的设计响应，如对产品工作时的变形和应力水平进行约束。

OptiStruct 采用数学规划方法，通过求解灵敏度构造近似显式模型，采用小步长迭代找到最优解，是目前工程上高效、稳健的优化方法，可以求解包含上百万变量或约束的优化问题，其内部优化流程如图 1-1 所示。

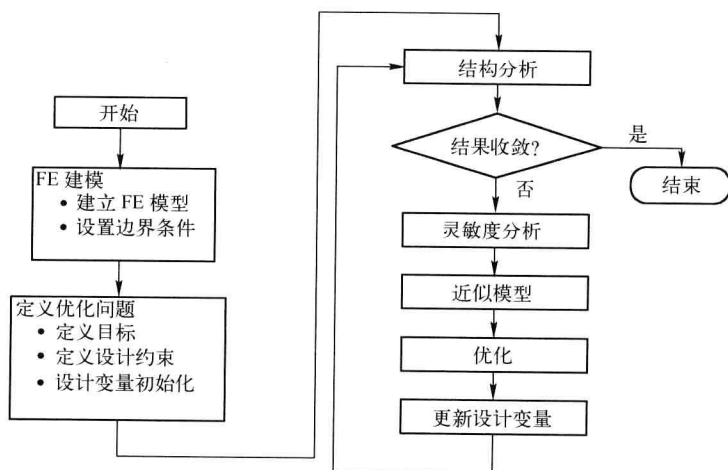


图 1-1 OptiStruct 内部优化流程

1.2.2 灵敏度分析

设计灵敏度就是设计响应对优化变量的偏导数。对于有限元方程

$$[K] \{U\} = \{P\}$$

两边对设计变量 X 求偏导数

$$\frac{\partial [K]}{\partial X} \{U\} + [K] \frac{\partial \{U\}}{\partial X} = \frac{\partial \{P\}}{\partial X}$$

则对位移向量 U 的偏导数为

$$\frac{\partial[U]}{\partial X} = [K]^{-1} \left(\frac{\partial\{P\}}{\partial X} - \frac{\partial[K]}{\partial X} \{U\} \right)$$

一般来说, 设计响应是位移向量 U 的函数

$$g = \{Q\}^T \{U\}$$

所以设计响应对设计变量的偏导数为

$$\frac{\partial g}{\partial X} = \frac{\partial Q^T}{\partial X} \{U\} + Q^T \frac{\partial \{U\}}{\partial X}$$

如果直接采用上述方法求解, 称做直接法。直接法适合于设计约束很多而设计变量较少的优化问题, 如形状优化和尺寸优化的灵敏度求解。对于设计约束较少而设计变量很多的优化问题, 如拓扑优化和形貌优化, 在计算灵敏度时可以引入伴随变量 E 。伴随变量 E 满足

$$[K]\{E\} = \{Q\}$$

从而

$$\frac{\partial g}{\partial X} = \frac{\partial Q^T}{\partial X} \{U\} + \{E\}^T \left(\frac{\partial\{P\}}{\partial X} - \frac{\partial[K]}{\partial X} \{U\} \right)$$

这种方法叫做伴随变量法。

1.2.3 近似模型拟合

直接对有限元模型进行优化在每个迭代步将需要多次有限元求解, 工作量很大, 同时有限元模型是隐式的, 必须进行显式近似从而建立显式近似模型, 方便进行后续优化。

利用灵敏度信息对设计响应进行展开, 从而得到显式近似模型, 有以下几种近似方法。线性近似:

$$\tilde{g}_j(X) = g_{j0} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial g_j}{\partial X_i} (X_i - X_{i0})$$

倒近似:

$$\tilde{g}_j(X) = g_{j0} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial g_j}{\partial X_i} X_{i0}^2 \left(\frac{1}{X_i} - \frac{1}{X_{i0}} \right)$$

凸近似:

$$\tilde{g}_j(X) = g_{j0} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial g_j}{\partial X_i} c_{ji} (X_i - X_{i0})$$

其中,

$$c_{ji} = 1 \quad \text{当} \quad \frac{\partial g_j}{\partial X_i} \geq 0, \quad c_{ji} = \frac{X_{i0}}{X_i} \quad \text{当} \quad \frac{\partial g_j}{\partial X_i} < 0$$

OptiStruct 自动选择近似方法进行优化模型的显式近似。