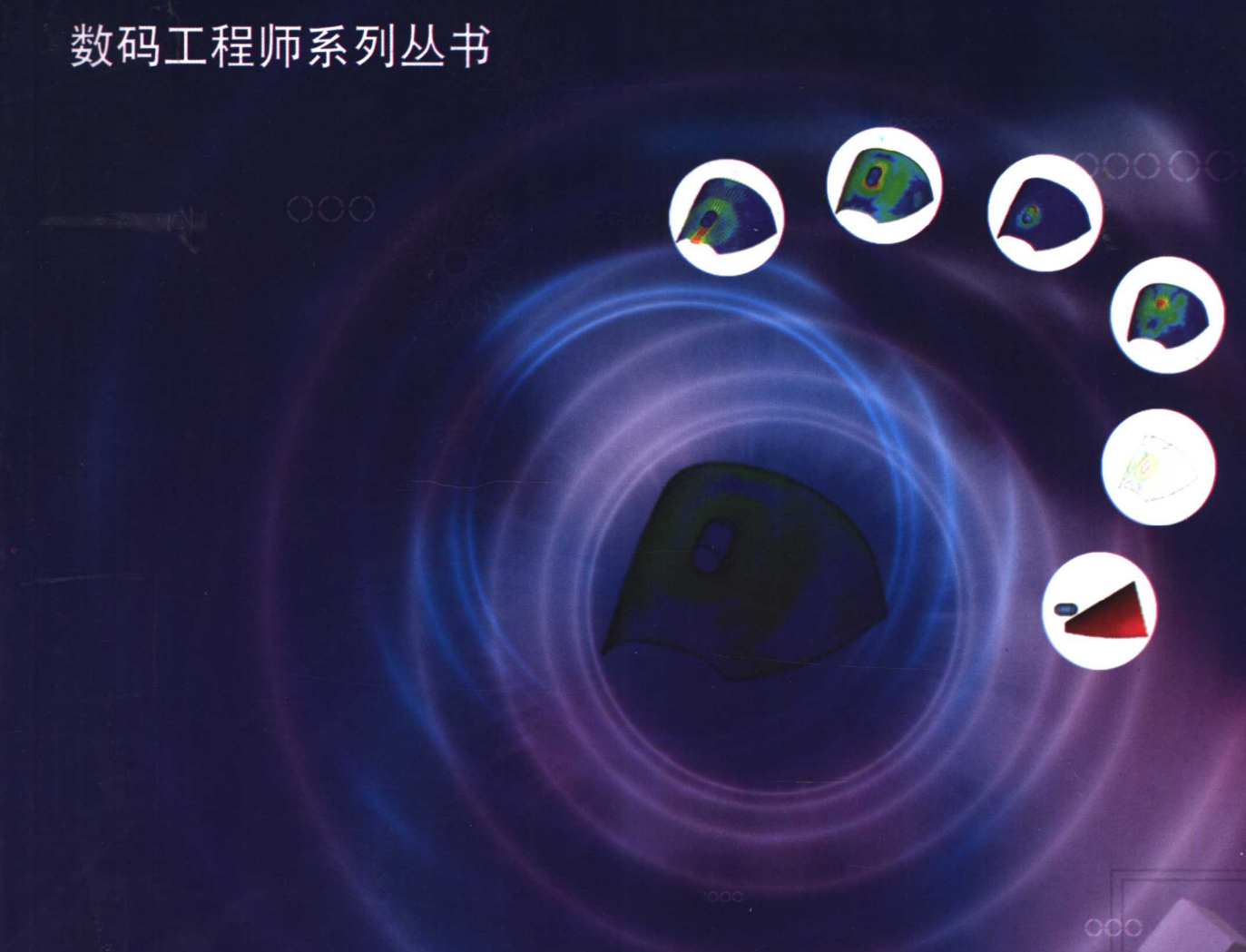


数码工程师系列丛书



工程有限元与优化分析 应用实例教程

周传月 腾万秀 张俊堂 主编



科学出版社
www.sciencep.com

数码工程师系列丛书

工程有限元与优化分析 应用实例教程

周传月 腾万秀 张俊堂 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍有限元分析和结构优化分析的基本概念、分析方法和分析过程,以及有限元与结构优化分析软件 OptiStruct。本书共 12 章,通过大量的分析实例展示了 OptiStruct 进行有限元分析和结构优化分析的能力。

本书中的实例操作过程详细明了,适合初学有限元分析和优化分析的读者作为入门学习的教材,对有一定基础的读者又可作为深入学习的参考书。本书也可作为汽车、航空航天、核工业、铁路、石油化工、机械制造、能源、电子、造船等领域的广大工程技术人员了解和学习 OptiStruct 软件的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程有限元与优化分析应用实例教程/周传月等主编. —北京:科学出版社, 2005

(数码工程师系列丛书)

ISBN 7-03-015435-5

I.工… II.周… III.①有限元法-教材②有限元分析-应用软件, OptiStruct-教材 IV.0241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 039878 号

责任编辑:吕建忠 赵卫江/责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉/封面设计:飞天创意

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005 年 6 月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—3 000 字数:400 000

定价:32.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135397-8001(BI01)

前 言

有限元方法随着计算机技术和计算方法的发展,已经成为计算力学和计算工程科学领域里最有效的计算方法。以有限元方法为基础的有限元分析和优化分析是实际工程中最常遇到的问题。对于工程技术人员,尤其是许多没有或很少学习过有限元理论的工程技术人员而言,有限元分析技术和结构优化分析技术是一种较难掌握的技术。被业内公认的优秀有限元分析和结构优化分析软件 OptiStruct 是有限元分析和结构优化分析的有效工具。

OptiStruct 属于著名的工程分析软件 HyperWorks 系列之一,是专门为产品的概念设计和精细设计开发的结构分析和优化工具,是当今最成熟的也是应用最广泛的优化类软件。OptiStruct 是以有限元方法为基础的最佳化工具,藉由拓扑(topology)优化、形貌(topography)优化、形状(shape)优化和尺寸(size)优化,可产生精确的设计概念或布局,其优化技术可以为产品的优化提供完整可行的解决方案。OptiStruct 提供了线性有限元求解器,用户可以使用其中的标准单元库和各种边界条件,进行线性静态、固有频率、惯性释放和频率响应分析。OptiStruct 与 HyperMesh 之间有无缝的接口,从而使用户可以快捷地进行问题设置、提交和后处理等一整套操作。

OptiStruct 优化方法多种多样,可以应用在设计的各个阶段,其优化过程可对静力、模态、屈曲分析进行优化,优化算法允许在大模型中存在上百个设计变量和响应。

本书主要由两部分内容组成。前一部分涉及有限元、有限元分析和有限元分析过程,同时介绍了当前市场上流行的优化分析软件和有限元分析软件,力图使读者快速了解有限元的发展和相应的软件技术;另外,在此部分重点介绍了 OptiStruct 软件的有限元分析技术和优化分析技术,以及 OptiStruct 软件的使用方法和优化过程。

后一部分以具体的分析实例和工程应用实例展现 OptiStruct 软件的主要功能、使用方法和应用 OptiStruct 软件进行有限元分析和优化分析的思路和方法。这些分析实例涉及有限元分析的线性静力分析、模态分析、屈曲分析、频率响应分析,以及优化分析的拓扑优化、形貌优化、形状优化和尺寸优化,另外还有一些经典的验证性算例。这些算例的原始条件和分析步骤都很详细,有兴趣的读者可以利用本书提供的电子文件完成每个分析算例。

本书配备电子文件,读者可以到科学出版社网站或者北京东方极峰公司网站下载(<http://www.emax.com>),也可以通过 E-mail 向作者索取。

本书由周传月、腾万秀、张俊堂主编,于开平、王超、崔晓兵、史纪鑫、王鸿飞、马力、温广华和何伟等参与了部分编写工作。本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学力学系的大力支持,书中部分内容还得到了一些朋友的帮助和指导,编者在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正,也欢迎用户和读者来信来函共同探讨。联系方式:CAEMesh@126.com或者 zhouchy@163.com。

目 录

第 1 章 有限元分析和有限元软件	1
1.1 什么是有限元分析	1
1.2 有限元方法和有限元分析的历史	1
1.3 应用领域	2
1.4 一个典型的分析流程	3
1.4.1 分析计划	4
1.4.2 前处理	4
1.4.3 求解	7
1.4.4 后处理	7
1.5 有限元方法和有限元分析的区别	9
1.6 优化分析软件介绍	9
1.6.1 OptiStruct	9
1.6.2 OptiShape	11
1.6.3 Tosca	11
1.7 主要有限元分析软件介绍	14
1.7.1 NEiNastran	14
1.7.2 SAMCEF	16
1.8 主流有限元前后处理软件介绍	23
1.8.1 HyperMesh 简介	23
1.8.2 Patran 简介	24
1.8.3 FEMAP 简介	25
1.8.4 SAMCEF Field 简介	26
1.8.5 ANSA 简介	27
1.8.6 GLview Pro 简介	27
1.8.7 EnSight 和 EnSight Gold 简介	30
第 2 章 OptiStruct 介绍	33
2.1 什么是 OptiStruct	33
2.1.1 有限元分析	33
2.1.2 拓扑优化	33
2.1.3 形貌优化	34
2.1.4 形状优化和尺寸优化	34
2.2 提高设计过程	34
2.3 OptiStruct 功能	36

2.4	OptiStruct 特性	36
2.4.1	有限元分析	36
2.4.2	优化	37
2.4.3	拓扑优化	38
2.4.4	形貌优化	38
2.4.5	尺寸优化	39
2.4.6	形状优化	39
2.4.7	前处理	39
2.4.8	后处理	39
2.5	OptiStruct 文件格式和运行平台	40
第 3 章	有限元分析	41
3.1	线性静力分析	41
3.2	惯性释放分析	41
3.3	正则模态分析	42
3.4	线性屈曲分析	42
3.5	频率响应分析	43
3.6	材料类型	45
3.7	静态载荷和边界条件	46
3.8	频率响应载荷和边界条件	47
3.9	弹性阻尼和质量单元	48
3.10	单元质量检查	49
3.11	刚性单元和多点约束	50
3.12	有限元分析结果	51
第 4 章	优化分析	54
4.1	优化问题	54
4.2	迭代解	54
4.3	敏度分析	55
4.4	约束放映的移动范围调整	56
4.5	响应	57
第 5 章	使用 OptiStruct	61
5.1	有限元分析	61
5.2	结构优化	61
5.3	与 HyperMesh 界面的转换	62
5.3.1	优化——常用功能	62
5.3.2	优化——问题的建立	62
5.3.3	优化——设计变量	63
5.4	优化宏菜单	63
5.4.1	FEA 页	63
5.4.2	OPTI 页	65

5.5	HyperMorph 基础	66
5.5.1	关于 HyperMorph	66
5.5.2	关于 handles 和 domains	67
第 6 章	优化应用算例	68
6.1	拓扑优化问题算例	68
6.1.1	吊桥拓扑优化	68
6.1.2	弯曲悬臂梁拓扑优化	70
6.2	形貌优化算例	73
6.2.1	扭转平板形貌优化算例	73
6.2.2	两层冲压控制臂优化	75
6.3	使用 pattern grouping 解决形貌优化问题	78
6.4	尺寸优化算例	80
6.4.1	尺寸优化算例介绍	81
6.4.2	十字桁架结构尺寸优化	82
6.5	形状优化算例	84
6.5.1	形状优化算例介绍	84
6.5.2	实体单元悬臂梁模型优化	87
第 7 章	有限元分析应用实例	90
7.1	带孔平板应力分析	90
7.2	热载荷作用下的咖啡壶盖子分析	94
7.2.1	在 HyperMesh 中定义分析问题	94
7.2.2	提交作业	98
7.2.3	查看结果	98
7.3	叶片模态分析	100
7.3.1	提取 OptiStruct 输入文件	100
7.3.2	在 HyperMesh 中设置分析问题	101
7.3.3	提交作业	104
7.3.4	查看结果	104
7.4	使用 Optistruct 惯性释放分析	107
7.4.1	提取文件并设置分析问题	108
7.4.2	提交作业	110
7.4.3	查看计算结果	111
7.5	圆柱壳屈曲分析	112
7.5.1	提取文件并设置分析问题	112
7.5.2	设置控制卡并进行屈曲分析	115
7.5.3	结果后处理	116
7.6	支架模态频率响应分析	119
7.6.1	设置模态分析	120
7.6.2	提交一个作业进行模态分析	124

7.6.3	查看模态结果	124
7.6.4	设置频率响应分析	125
7.6.5	提交一个作业进行频率响应分析及查看结果	129
7.7	使用 CWELD 单元连接不匹配的网格	131
7.7.1	在 HyperMesh 中设置问题	131
7.7.2	提交分析作业	135
7.7.3	对比结果	135
第 8 章	拓扑优化应用实例	137
8.1	开孔结构拓扑优化	137
8.1.1	设置有限元模型	137
8.1.2	施加载荷和边界条件	140
8.1.3	设置优化参数	142
8.1.4	提交作业	144
8.1.5	查看结果	144
8.2	汽车控制臂拓扑优化	147
8.2.1	设置有限元模型	148
8.2.2	施加载荷和边界条件	150
8.2.3	设置拓扑优化参数	154
8.2.4	提交作业	156
8.2.5	查看结果	156
8.3	带有拔模约束的控制臂拓扑优化	159
8.3.1	设置拓扑优化设计变量和拔模约束	159
8.3.2	设置优化参数	160
8.3.3	运行优化计算	161
8.3.4	结果后处理	162
8.4	L 型梁拓扑优化	165
8.4.1	设置有限元模型	167
8.4.2	施加载荷和边界条件	168
8.4.3	设置拓扑优化参数	172
8.4.4	提交作业	173
8.4.5	查看结果	174
8.5	制动连接臂拓扑优化	176
8.5.1	设置有限元模型	177
8.5.2	施加载荷和边界条件	178
8.5.3	设置拓扑优化参数	183
8.5.4	提交作业	184
8.5.5	查看结果	184
第 9 章	形貌优化应用实例	188
9.1	扭转板形貌优化	188
9.1.1	在 HyperMesh 中设置问题	189

9.1.2	提交作业	192
9.1.3	形貌优化结果后处理	193
9.2	L 型支架形貌优化	194
9.2.1	在 HyperMesh 中设置优化问题	195
9.2.2	提交作业	197
9.2.3	形貌优化结果后处理	197
第 10 章	尺寸优化应用实例	200
10.1	钢轨接头的尺寸优化	200
10.1.1	在 HyperMesh 中定义优化问题	200
10.1.2	提交作业	203
10.1.3	查看结果	204
10.2	焊接支架尺寸优化	206
10.2.1	设置有限元模型	207
10.2.2	定义设计变量并连接一个设计变量到另外一个设计变量	207
10.2.3	定义优化问题	208
10.2.4	求解优化问题	210
10.2.5	结果后处理	210
10.3	安全吊尺寸优化	213
10.3.1	设置有限元模型	213
10.3.2	定义设计变量并连接一个设计变量到另外一个设计变量	214
10.3.3	定义优化问题	215
10.3.4	求解优化问题	216
10.3.5	结果后处理	217
第 11 章	形状优化应用实例	219
11.1	二维悬臂梁形状优化	219
11.1.1	在 HyperMesh 中创建优化问题	219
11.1.2	提交作业	223
11.1.3	结果后处理	224
11.2	L 型悬臂梁形状优化	228
11.2.1	在 HyperMesh 中创建优化问题	228
11.2.2	提交作业	232
11.2.3	结果后处理	232
11.3	扳手形状优化	236
11.3.1	在 HyperMesh 中创建优化问题	236
11.3.2	提交作业	240
11.3.3	结果后处理	241
第 12 章	验证性算例	245
12.1	Raasch 问题	245
12.1.1	问题描述	245

12.1.2	有限元模型	245
12.1.3	分析结果	247
12.2	半球壳静力分析	248
12.2.1	问题描述	248
12.2.2	有限元模型	248
12.2.3	分析结果	249
12.3	端部简支梁面内振动问题	249
12.3.1	问题描述	249
12.3.2	有限元模型	250
12.3.3	分析结果	250
12.4	自由薄方板模态分析	255
12.4.1	问题描述	255
12.4.2	有限元模型	255
12.4.3	模态分析结果	256
12.5	锥形膜模态分析	258
12.5.1	问题描述	258
12.5.2	有限元模型	259
12.5.3	模态分析结果	259
12.6	菱形板模态分析	261
12.6.1	问题描述	261
12.6.2	有限元模型	262
12.6.3	模态分析结果	262
12.7	悬臂梁模态分析	264
12.7.1	问题描述	264
12.7.2	有限元模型	265
12.7.3	模态分析结果	265
主要参考文献		268

第 1 章 有限元分析和有限元软件

1.1 什么是有限元分析

有限元法（或称有限单元法）是当今工程分析中应用最广泛的数值计算方法。由于它的通用性和有效性，一直受到工程技术界的高度重视。伴随着计算机科学和技术的发展，它已成为计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）的重要组成部分，并发展成为计算机辅助工程（CAE）。

有限元分析（FEA）首先被运用于航空航天和核工业领域，因为在这些行业中，结构的安全是非常重要的。近 20 年来，有限元法被大量采用，这应直接归因于计算机技术的发展。因此，商业有限元软件能够解决非常复杂的问题，而不仅仅只解决结构的问题。

有限元分析由赋有材料属性的计算机模型或带有载荷和分析结果的图形构成，它被用于对新产品的设计和对已有产品的优化，用于在制造或建设前期对设计按照规范进行验证，还用于调整现有的产品或结构使其能满足新的服务条件。

分析的结构被细分为简单形状的微小网格单元，在每个单元里，位移变量假定由简单多项式图形函数和节点位移确定。应变和应力方程通过未知的节点位移扩展得到。从这一点看，平衡方程被假定为矩阵的形式，这种形式的矩阵很容易在计算机上通过编程求解。节点位移可以通过刚度矩阵方程进行求解。一旦得到了节点位移，单元应力和应变也能够被求解。

在每个模拟设计中，程序员能够插入大量的函数，这些函数可以使得系统为线性或非线性的形式。线性系统大大减少了复杂程度，通常它忽略了许多细微的加载和动作模拟；非线性系统计算形式更贴近实际，例如塑性变形、变化载荷等，同时它也能验证各种类型的破坏因素。

不管商业软件的功能和扩展能力有多神奇，它的本质都是将技术的理解和物理过程融入到分析中，只有这样才能选择合适的、准确的分析模型，并给出正确的定义和解释。

1.2 有限元方法和有限元分析的历史

从应用数学的角度考虑，有限元法的基本思想的起源可以追溯到美国著名数学家 R. Courant 在 1943 年的工作。他首先尝试应用在一组三角形区域上定义的分片连续函数和最小位能原理相结合的方法，来求解 St. Venant 扭转问题。此后，不少应用数学家、物理学家和工程师分别从不同角度对有限元法的离散理论、方法及应用进行了研究。Turner、Clough、Martin 和 Topp 于 1956 年发表了一篇文章，这篇文章提出了数值分析的广义定义。有限元法的实际应用是随着电子计算机的出现而开始的。首先是 Turner、Clough 等人于 1956 年将刚架分析中的位移法推广到弹性力学平面问题，并用于飞机结构的分析。他们首次给出了用三角形单元求解平面应力问题的正确答案。三角形单元的

特性矩阵和结构的求解方程是由弹性理论的方程通过直接刚度法确定的。他们的研究工作开始了利用计算机求解复杂弹性力学问题的新阶段。1960 年 Clough 进一步求解了平面弹性问题,并第一次提出了“有限元法”的名称,使人们更清楚地认识到有限单元法的特性和功效。

在 20 世纪 70 年代前期,有限元分析一般仅局限在拥有昂贵的大型计算机的航空、汽车、国防、核工业等领域,而且分析的范围非常有限。到了 70 年代,Zeinkiewicz 和 Cheung 等人进一步扩展了有限元技术。他们通过用拉普拉斯方程来完成对一般问题的描述。数学家们正努力开发出更好的求解算法。一维线性元和 Rayleigh-Ritz 法的出现优化了特定类别的常规类问题的求解。在非线性问题的求解和模拟研究方面, Hinton 和 Crisfield 成为主要的贡献者。

当有限元方法快速进步的时候,其他的领域也在发展。强大的网格生成方法得到发展,除了复杂的几何模型外,商业软件已经具备了生成网格的能力。高级 CAE 理论也产生了,它通常只需要一个简单的 CAD 模型进行工程制图,执行运动分析和组装分析,它也可以作为有限元模型来使用。另外,由于计算机成本的快速降低和计算能力的显著提升,目前台式计算机能够对各种参数进行精确的计算(标准个人计算机的计算能力是 20 世纪 90 年代早期的超大型计算机计算能力的 10 倍之多)。这些都为有限元法的发展提供了有力支持。

有限元方法建立在多学科的基础之上,进而形成了一种技术,这种技术如此的先进,以致于它几乎就像变魔术。有限元方法和有限元分析方面的书籍也大量出现。为了充分理解 CAE 的全部内涵,用户必须熟悉许多概念,包括被模拟问题的结构。所有的分析需要的是时间、经验和非常重要的周密的计划。

1.3 应用领域

从本质上讲,有限元是用来解决常微分方程和偏微分方程的一种数学方法,因为它是一种数学方法,它能够求解那些用微分方程的形式描述的复杂问题,当这些类型的方程很自然地发生在自然科学的各个领域时,有限元方法被无限制地应用到求解实际设计的问题中。

由于高成本的计算处理年代已经过去,有限元分析有了被用来解决复杂和关键问题的历史。通常情况下,传统单一方法不能提供足够的信息来确定土木工程建筑的安全工作限度。例如高层建筑、大的浮动桥或核反应堆的失败,其高昂的经济成本和恶劣的社会影响是我们无法承受的。

近年来,有限元分析几乎被大量应用于解决结构工程问题,尤其航空工业更加依赖于这个技术。由于对飞机快速、结实、轻便和经济的要求,制造商必须依靠这个技术来保持竞争优势。但是更重要的是,为了安全,这个行业暴露出来的问题是零部件的制造成本高,同时它也是媒体关注的焦点,飞机制造商需要确保每个零件在发生破坏之前,提供停止使用的设计计划。

有限元分析被用在大量产品生产和制造工业已有很多年。错误的产品设计将会带来极大的危害,例如一个大的制造商因为一个活塞设计错误而不得不收回一个模型,最后

不得不更换 100 万个活塞。类似地，如果一个主要的部件出现错误，收入的损失远远超过了安装和替换部件所需要的成本费用，这还不包括相应事故所造成的环境和安全损失费用。

在工程设计方面有限元方法是一种非常重要的工具，它经常被用于解决下面领域中的问题：

- 结构强度设计；
- 结构流体分析；
- 冲击分析；
- 噪声；
- 热分析；
- 振动；
- 碰撞仿真；
- 流体分析；
- 电分析；
- 质量扩散；
- 屈曲问题；
- 动力学分析；
- 电磁计算；
- 金属成型。

现在，甚至最简单产品的设计评估也依赖有限元的方法。这是因为使用其他现有的方法通常不能精确和经济实惠地解决当前的设计问题。以物理实验作为标准的时代已经过去，现在看来它的成本确实太高了。

1.4 一个典型的分析流程

在实际应用中，分析模式并没有固定的形式，通常总是存在几个方面与其他的分析不同。但是调查发现大多数有限元分析都采用了一个主要流程。详细的流程描述如图 1-1 所示。

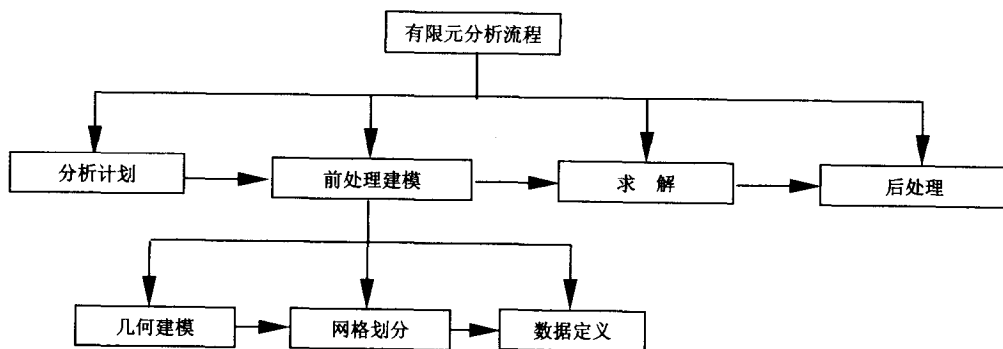


图 1-1 有限元分析流程

有限元前处理软件 SAMCEF Field 是这一分析流程的具体体现。如图 1-2 所示, 在 SAMCEF Field 中, 有限元分析流程分为五个方面, 即 Modeler (建模)、Analysis Data (分析数据定义)、Mesh (网格划分)、Solver (求解) 和 Result (结果处理)。

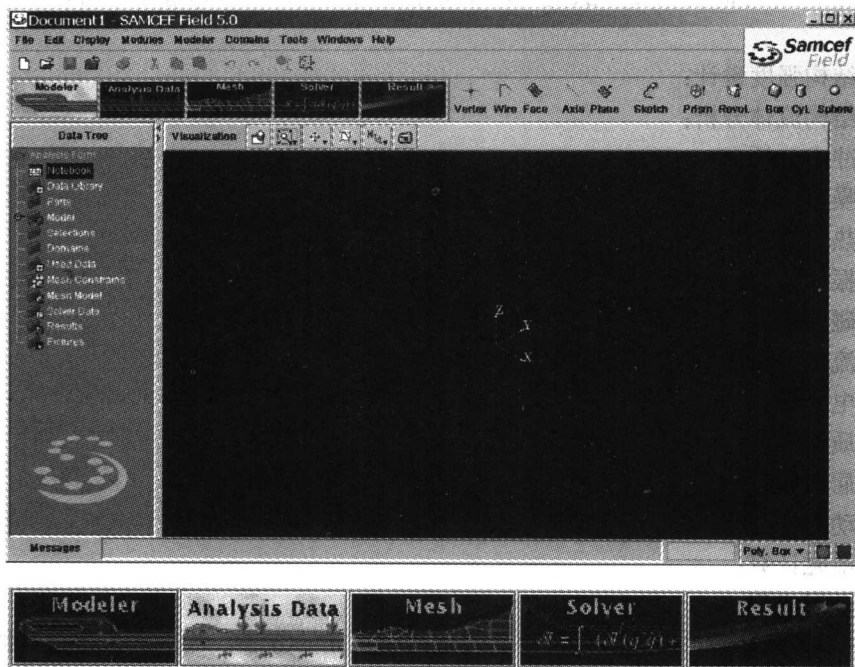


图 1-2 SAMCEF Field 有限元分析流程

1.4.1 分析计划

分析计划对于任何分析都是最重要的部分, 这有助于我们进行准确的仿真, 而这方面通常是一个分析中容易被遗漏的环节。有限元分析的目的是模拟在系统载荷作用下的结构行为。为此, 所有的影响因素必须被考虑, 同时要确定它们对最后结果的影响是不是应该考虑或者被忽略。任何系统能够模拟的准确程度主要取决于执行的计划标准。

1.4.2 前处理

通常的有限元软件在前处理阶段包含下面的内容。

1. 明确问题名称

这是可以选择的但是非常有用, 尤其是对在相同模型基础上完成的重复设计。

2. 设置使用的分析类型

例如结构、流体、热或电磁等 (有时候仅仅通过选择一种单元类型就能够确定分析的类型)。

3. 创建模型

几何模型和有限元模型可在适当的单位制下，在一维、二维或三维设计空间中创建生成。这些模型可在有限元前处理软件中创建，或者从其他的 CAD 软件包以中性文件的格式（IGES, STEP, ACIS, Parasolid, DXF 等）输入进来。如果一个模型用毫米单位绘制，材料属性用国际单位定义，那么结果放大比例系数是 10^6 。在每个方向上都应该使用相同的单位。否则将很难解释这个结果，或者在特殊的情况下，在施加载荷和约束过程中结果将不能显示出错误。

4. 定义单元类型

定义单元是一维、二维还是三维的，或者执行特定的分析类型。例如需要使用热单元进行热分析。

5. 应用网格

网格生成是一个将分析的连续体划分为离散部件或有限元网格的过程。网格质量越好，计算结果越精确，但是分析的时间越长，所以需要在保证准确性和求解速度之间进行折中选择。网格可以手工创建，如图 1-3 所示为手工创建的六面体网格；或者自动生成的四面体网格如图 1-4 所示。在创建网格过程中，我们注意到在零件连接位置单元更小，这就是众所周知的网格细化，它能够更准确地保证连接位置的应力准确性。

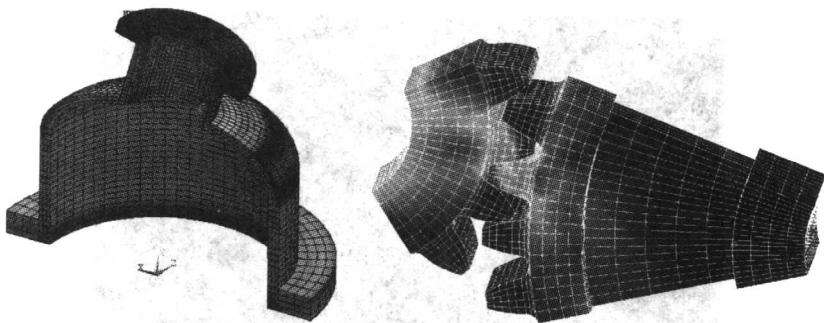


图 1-3 六面体网格

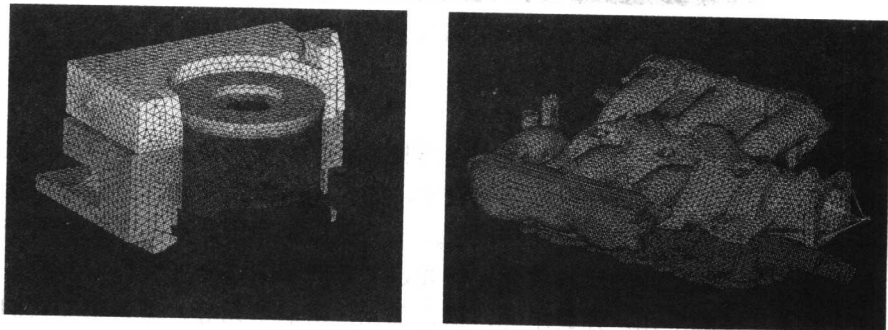


图 1-4 四面体网格

对于带有复杂几何的模型,手工划分网格将是一个长时间枯燥乏味的过程,但随着在前处理阶段有用工具的出现,这项任务也变的更加容易。图 1-5 所示是利用 HyperMesh 软件,采用人工控制生成的发动机缸体六面体网格,此网格囊括了六面体网格划分的精髓。自动网格生成是非常有用和流行的方法,网格通过一个网格按钮自动创建。四面体自动网格生成的关键是通过调整边界上的网格密度控制网格数量和质量,而不仅仅沿着模型的边界定义网格密度。图 1-6 所示是利用 HyperMesh 软件生成的高质量四面体网格。自动六面体单元网格划分功能还很有限,但是也在不断地改进。任何网格通常通过在前处理图形界面中选择简单的网格命令的方式而得以应用。

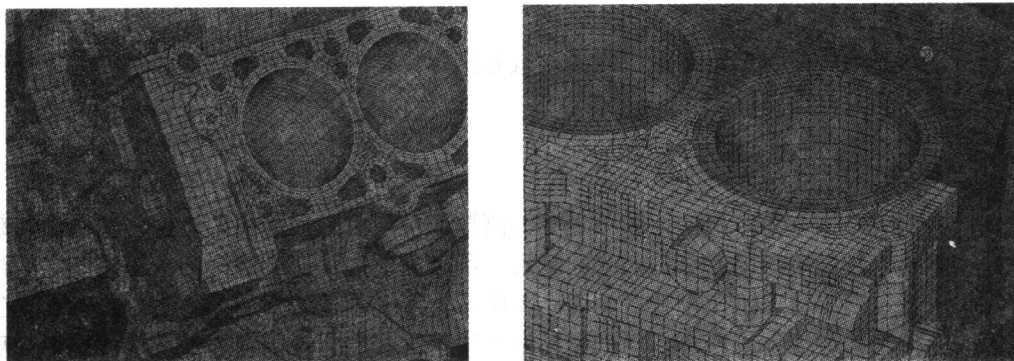


图 1-5 发动机缸体六面体网格

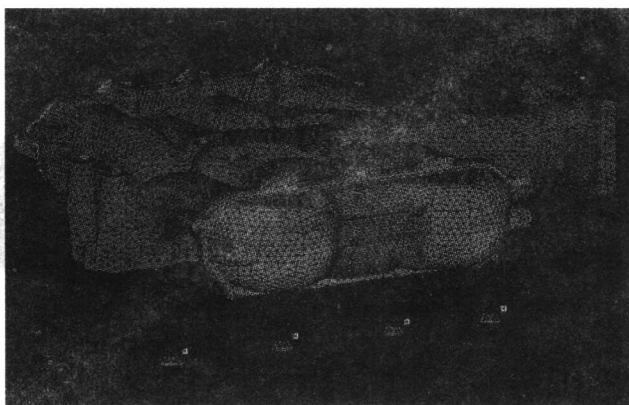


图 1-6 发动机排气管四面体网格

6. 分配属性

材料属性(杨氏模量,泊松比,密度,膨胀系数,摩擦系数,热传导率,阻尼衰减等)必须被定义,另外单元属性也需要被设定,如果使用二维单元,就需要定义单元厚度属性,一维梁单元需要定义梁截面特性 I_{xx} 、 I_{yy} 、 I_{xy} 、 J 和指定梁截面在三维空间中的方向,壳单元(在三维空间的二维单元)需要定义方向和中性面的偏移量参数。特殊的单元(质量单元,接触单元,弹簧单元,耦合单元,阻尼单元等)需要定义它们使用的属性(明确单元类型)。

施加载荷。某些类型的载荷通常被应用在分析模型中，在应力分析中载荷可能是一个点载荷、压强载荷或位移的形式，在热分析中载荷可能是温度或热流量，在流体分析中载荷可能是流体压强或速度。载荷可能被应用在一个点、一条边、一个面，甚至一个完整的体上，载荷的单位需要与几何模型和材料属性的单位统一，对于模态和屈曲分析情况，分析中并不需要明确载荷。

7. 应用边界条件

如果你已经在模型上施加载荷，为了在计算机虚拟过程中阻止其无限的加速，至少需要施加一个约束或边界条件。结构的边界条件通常以零位移的形式构成，热的边界条件通常是明确温度，流体的边界条件通常是明确压强，一个边界条件可能明确所有方向(x,y,z)或特定的方向。它们能被放在节点、关键点、面或线上。在线上的边界条件可以是对称或反对称形式。一方面允许平面内旋转和平面外平移，另一方面允许平面内平移和平面外在确定的线方向的平面旋转。正确施加边界条件是准确求解设计问题的关键。每个模型至少需要一个边界条件。

1.4.3 求解

值得欣慰的是这个部分是全自动的，有限元求解从逻辑上被分为三个主要部分：前置求解(pre-solver)、数学引擎(mathematical-engine)和后置求解(post-solver)。在仿真过程中前置求解读取在前处理阶段创建的数学模型并形成模型的数学描述。所有在前处理阶段定义的参数都被使用在这里，因此如果你遗漏了一些事情，在前置求解阶段将取消调用数学引擎。如果模型是正确的就会形成求解所需要的问题的单元刚度矩阵，并通过调用数学引擎产生计算结果(位移、温度、压强等)。这个结果被送到求解器中，通过后置求解来计算节点和单元应变、应力、热流量、速度等，所有这些结果信息被发送到一个结果文件中，并通过后处理进行读取。

1.4.4 后处理

在这里就能够读取和解释分析的结果。它们可以通过列表、等值云图、零部件变形等方式描述，如果分析中包含了频率分析也可以以固有频率变形等方式进行描述。对于流体、热和电磁分析类型也可以获取其他的计算结果。大部分的后处理提供了动画功能。

对于结构类问题，等值云图通常是一种最有效的结果展示，并可以通过切开三维模型查看模型内部应力情况。

所有的后处理现在都包括了任何x、y和z方向或者与坐标轴成一定角度的应力应变计算，主应力和应变可以被绘制，或者根据主要破坏原理(合成应力、扭转、屈服等)产生应力和应变，对于特定的分析类型，其他的信息(例如应变能、塑性应变)也可以通过后处理获得。典型的应力等值云图见图1-7。

此外xy曲线作为后处理的一部分，可以描述位移、速度、加速度和应力、应变等结果随时间和频率，或者空间位置的变化。图1-8和图1-9所示是典型的xy曲线。