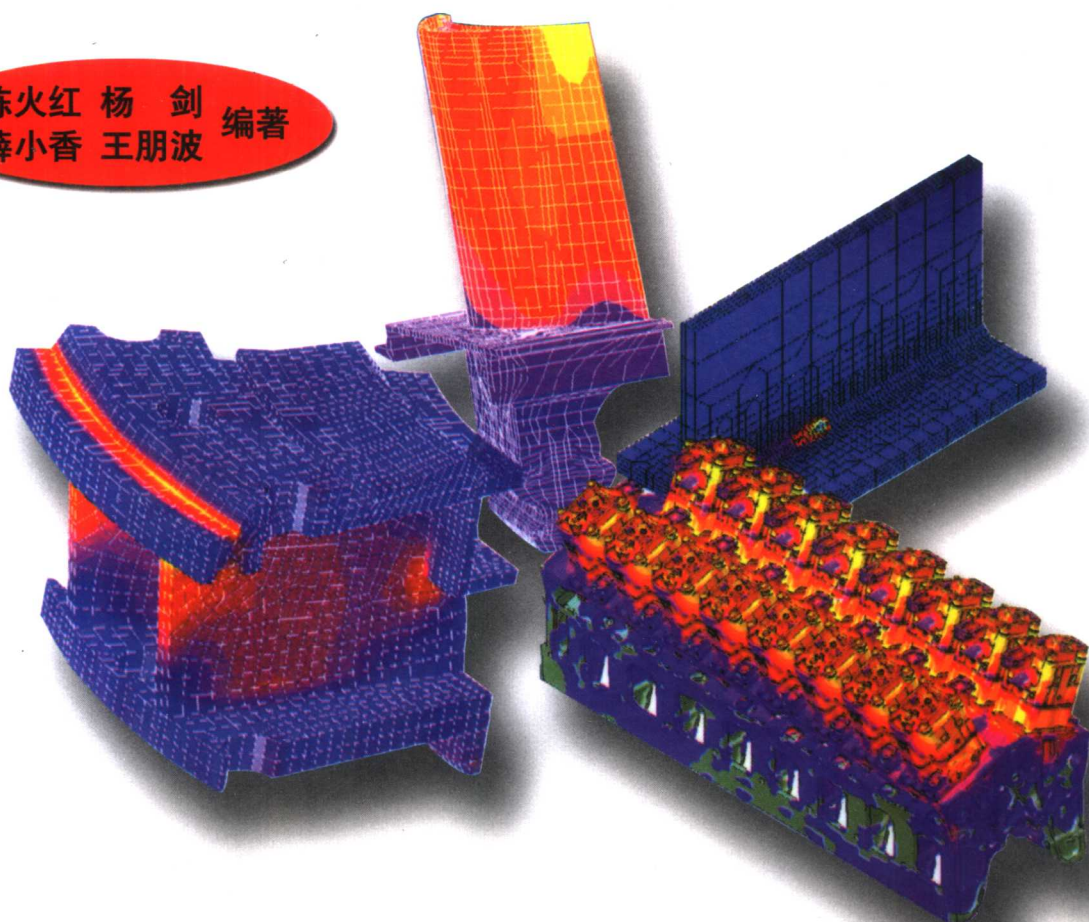


新编

Marc有限元实例教程

陈火红 杨 剑 编著
薛小香 王朋波

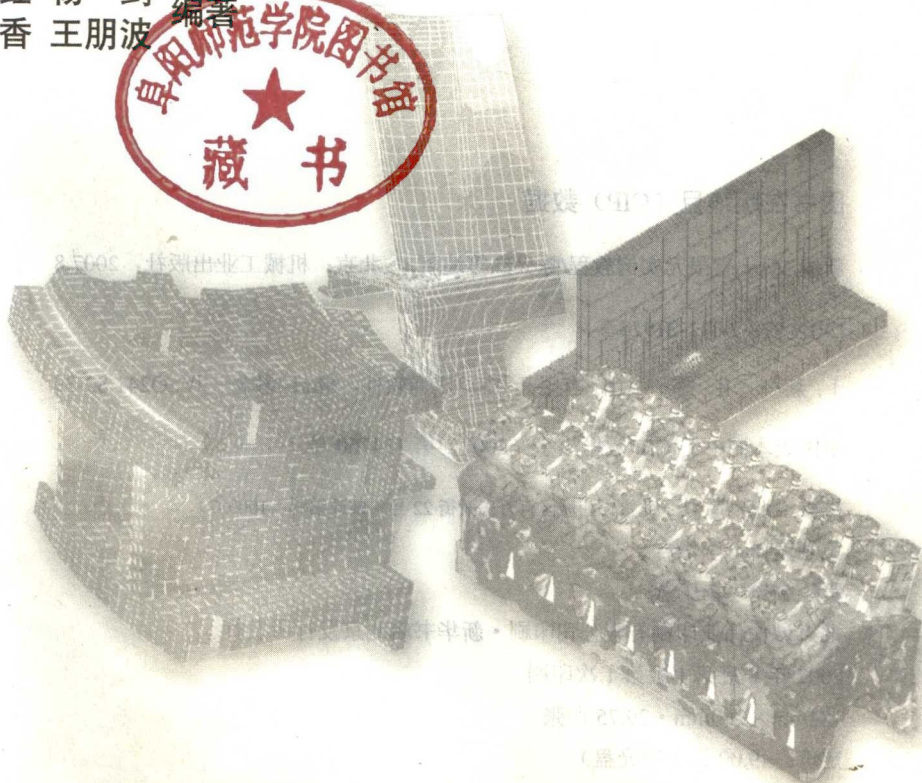


机械工业出版社
China Machine Press

新编

Marc有限元实例教程

陈火红 杨 剑 编著
薛小香 王朋波



机械工业出版社
China Machine Press

本书介绍 MSC.Marc 软件的基本概念及其在各个领域的使用方法。全书共分 15 章, 主要内容包 括: Marc 软件的基本方法与使用技巧, 各类结构的线性静力分析, 各类常用的材料非线性问题的分析方法和过程, 接触问题分析方法和过程, 动力学分析功能, 结构热传导和热应力分析中的方法和过程, 电磁场、热电耦合和热电结构耦合分析的基本理论和使用方法, 网格自适应和重划分的使用方法, 常用的连接技术。本书内容广泛, 实用性强, 读者可根据自己的需要进行选择性阅读。本书配有光盘, 对书中的例子配有解说动画, 可以帮助读者快速掌握各种功能的使用方法。

本书可作为理工科院校相关专业高年级本科生、研究生的教材, 也可供教师和广大科研工程技术人员学习和使用 Marc 时参考。

版权所有, 侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目 (CIP) 数据

新编 Marc 有限元实例教程/陈火红等编著. - 北京: 机械工业出版社, 2007.8

ISBN 978-7-111-21974-3

I. 新… II. 陈… III. 有限元分析-应用软件, Marc-教材 IV. O241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 114760 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李华君

责任编辑: 杨庆燕

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2007 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·29.75 印张

定价: 49.00 元 (附光盘)

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换
本社购书热线: (010) 68326294

序 言

有限元方法诞生于 20 世纪中叶,随着计算机技术和计算方法的发展,已成为计算力学和计算工程科学领域里最有效的计算方法。经过 40 年的发展不仅使有限元方法的理论日趋完善,而且已经开发了一批通用和专用有限元软件,使用这些软件已经成功地解决了众多领域的大型科学和工程计算难题,并且取得了巨大的经济效益。

作为国际上第一个通用非线性商用有限元软件, Marc 软件从 20 世纪 70 年代初诞生至今的 30 年多年中,一直紧跟有限元方法的理论和计算机软硬件发展的最新进展,已发展成为功能强大、界面友好的有限元软件系统。它拥有丰富和完善的单元库、材料模型库和求解器,能够高效地求解各类结构的静力和动力中的线性、高度非线性问题,稳态和瞬态热分析及热-结构耦合问题,电磁场问题,以及其他多场耦合问题;友好的图形用户界面和程序结构使用户易学易用;接口的开放性使用户很方便扩展程序功能。

Marc 软件于 20 世纪 90 年代开始在我国航空航天、核工业、铁路运输业、石油化工、机械制造、能源、汽车、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利等领域得到广泛的应用,为各领域中产品设计、科学研究做出了很大贡献。

尽管经过开发者不断努力, Marc 越来越简便易用,但因为要解决的问题是具有复杂的科学和工程背景的难题,而且 Marc 又是一个知识密集的高科技产品。因此,为使用户更好地使用 Marc,出版一本系统介绍 Marc 使用方法的简明实用的书是十分必要的。本书正是为了满足这一需求而编写出版的。

本书可作为广大工程技术人员使用 Marc 软件的参考书,也可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 Marc 软件的教材或参考书。

本书既有有限元基本理论的介绍,也有使用菜单的介绍,更有大量的实例讲解,编者为了使初学者更快地掌握软件的实际操作,精心录制了带有配音的动画文件,使读者很容易学会使用 Marc 分析各类问题。

本书内容广泛,不同的读者均可以从中受益。初学者学习本书可以达到入门的目的,而一些老用户则可以从中学到一些新功能。

由于本书的各位作者具有长期使用 Marc 软件的经验以及对用户进行 Marc 软件培训和技术支持的经验,因此本书既是一本非常实用的书,也是公司对用户进行 Marc 软件培训用书。

MSC Software 中国区技术总监

金毅民

前 言

Marc 软件于 20 世纪 90 年代开始在我国航空航天、核工业、铁路运输业、石油化工、机械制造、能源、汽车、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利等领域得到广泛的应用,为各领域产品设计、科学研究做出了很大贡献。

我们也曾经根据用户的需求编写过一些教材,但几年来 Marc 不断推出新版本,菜单和功能都有了些改进,为使用户特别是新用户更好地掌握和使用 Marc,出版一本新的系统介绍 MSC.Marc 使用方法的简明实用的书是十分必要的。本书正是为了满足这一需求而编写出版的。

本书介绍了 MSC.Marc 软件在各个领域的基本理论和使用方法。全书共分 15 章:第 1 章为 Marc 程序概况,简要介绍 Marc 程序的发展过程、主要模块、功能概况、安装以后产生的主要目录、主要文档等,使读者对软件有一个初步的认识;第 2 章介绍了有限单元法求解基本过程,简要介绍了线性和非线性有限元求解的基本步骤和求解方法、Marc 采用的非线性迭代收敛判据、单元的使用方法、Marc 的运行命令以及产生的相关文件、Marc 常用的求解器以及内存分配和空间需求的有关信息,使读者对 Marc 的使用有一个初步的理论准备;第 3 章介绍了前后处理程序 Mentat 的常用菜单,使读者对常用菜单有所了解,使用时清楚菜单所在的位置;第 4 章介绍了 Mentat 几何建模和网格生成的基本方法,使用户学会如何在 Mentat 中读入和创建几何模型、划分各类网格;第 5 章介绍了 Marc 的结果输出,使读者掌握如何定义所需的结果变量、理解各类结果的含义;第 6 章介绍单元的类型以及使用方法,使读者能够掌握根据需求选择合适的单元,以便更好地得到准确的结果;第 7 章介绍各类结构的线性静力分析,使读者掌握线性静力分析的过程和方法;第 8 章介绍各类常用的材料非线性问题的分析方法和过程,使读者对 Marc 中常用的材料模型的定义和使用有比较深入的了解;第 9 章介绍几何非线性的分析方法和分析过程,使读者掌握大位移、大应变分析和屈曲分析方法和过程;第 10 章介绍接触问题分析方法和过程,使读者能够学会如何定义接触体、接触表,了解 Marc 采用的接触算法,懂得如何定义摩擦类型和摩擦系数等;第 11 章介绍 Marc 的动力学分析功能,使读者能了解 Marc 动力学分析所采用的方法以及对结构进行模态分析、瞬态动力学分析等分析过程和操作步骤;第 12 章介绍了 Marc 在结构热传导和热应力分析中的方法和过程,使读者学会进行热分析、热应力分析和热机耦合分析的方法和操作步骤;第 13 章介绍了电磁场、热电耦合和热电结构耦合分析的基本理论和使用方法,使读者掌握静电场、静磁场、电磁场、热电耦合以及热电结构耦合的分析方法和基本过程;第 14 章介绍网格自适应和重划分的使用方法,使读者在需要时能够会用 Marc 中颇具特色的网格自适应和网格重划分的功能;第 15 章介绍连接技术,使读者较快掌握 Marc 常用连接关系的定义方法和操作过程。

由于本书内容广泛,读者可根据自己的需要进行选择性阅读。要充分掌握软件,还需要进行大量的上机操作。本书配有光盘,书中的所有例子都配有有解说的动画,学习时可以边操作边看动画。

本书可作为理工院校相关专业的高年级本科生、研究生、教师和广大科研工程技术人员学习 Marc 软件的教材和使用 Marc 软件的参考书。

本书编写过程中得到了 MSC.Software 中国各办事处的很多同事的大力支持，其中李毅波工程师还编写了一些实例，编者在此深表谢意。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2007 年 8 月

于北京航空航天大学



专业成就人生
立体服务大众

www.hzbook.com

填写读者调查表 加入华章书友会 获赠精彩技术书 参与活动和抽奖

尊敬的读者：

感谢您选择华章图书。为了聆听您的意见，以便我们能够为您提供更优秀的图书产品，敬请您抽出宝贵的时间填写本表，并按底部的地址邮寄给我们（您也可通过www.hzbook.com填写本表）。您将加入我们的“华章书友会”，及时获得新书资讯，免费参加书友会活动。我们将定期选出若干名热心读者，免费赠送我们出版的图书。请一定填写书名书号并留全您的联系信息，以便我们联络您，谢谢！

书名：

书号：7-111-()

姓名：	性别： ☐ 男 ☐ 女	年龄：	职业：
通信地址：		E-mail：	
电话：	手机：	邮编：	

1. 您是如何获知本书的：

☐ 朋友推荐 ☐ 书店 ☐ 图书目录 ☐ 杂志、报纸、网络等 ☐ 其他

2. 您从哪里购买本书：

☐ 新华书店 ☐ 计算机专业书店 ☐ 网上书店 ☐ 其他

3. 您对本书的评价是：

技术内容	☐ 很好	☐ 一般	☐ 较差	☐ 理由_____
文字质量	☐ 很好	☐ 一般	☐ 较差	☐ 理由_____
版式封面	☐ 很好	☐ 一般	☐ 较差	☐ 理由_____
印装质量	☐ 很好	☐ 一般	☐ 较差	☐ 理由_____
图书定价	☐ 太高	☐ 合适	☐ 较低	☐ 理由_____

4. 您希望我们的图书在哪些方面进行改进？

5. 您最希望我们出版哪方面的图书？如果有英文版请写出书名。

6. 您有没有写作或翻译技术图书的想法？

☐ 是，我的计划是_____ ☐ 否

7. 您希望获取图书信息的形式：

☐ 邮件 ☐ 信函 ☐ 短信 ☐ 其他_____

请寄：北京市西城区百万庄南街1号 机械工业出版社 华章公司 计算机图书策划部收
邮编：100037 电话：(010) 88379512 传真：(010) 68311602 E-mail: hzjsj@hzbook.com



专业成就人生
立体服务大众

www.hzbook.com

华章计算机图书作译者指南

1. 华章出版哪些计算机图书?

我们出版面向IT专业人员的技术图书, 以及计算机基础类、应用类图书, 还包括各类院校的计算机教材。您可以投稿, 也可以向我们推荐外版选题。

2. 华章的选题列选、出版流程

(1) 本版选题: 作者提交“图书选题登记表”(附目录大纲、内容简介和样章)→选题论证→选题审批→签订“约稿合同”→作者写作→作者提交部分稿件→作者交齐稿件→编辑初审→编辑进行编辑加工等出版流程→为作者寄样书→支付作者稿酬。

(2) 外版选题: 译者提交试译稿→与译者签订“翻译合同”→译者翻译稿件→翻译过程中提交部分译稿→提交全部译稿→编辑初审→编辑进行编辑加工等出版流程→为作者寄样书→支付译者翻译稿酬。

3. 如何投稿给华章?

您可以通过下列的联系方式与我们直接取得联系:

投稿E-mail信箱: cjk@hzbook.com

联系电话: (010) 88379512 传真: (010) 68311602

邮寄地址: 北京市西城区百万庄南街1号 邮编: 100037

请尽量提供您常用的联系方式: 例如电话、E-mail等, 方便我们与您取得联系。

4. 选题列选后您所需进行的工作

将会有指定的责任编辑负责您的稿件, 与您签订约稿合同, 并在图书编辑出版的全过程中与您联络、沟通。

5. 如何交稿

如果稿件的电子文件较小, 您可以直接将文件发到我们的投稿信箱(cjk@hzbook.com)。对于较大的文件, 您也可以将书稿电子文件刻成光盘邮寄给我们。

6. 从交稿到成书所需的时间

依稿件篇幅和稿件质量而定, 通常为2到3个月, 特殊情况下, 责任编辑会与您直接联系。

7. 可供选择的稿酬结算方式

版税制: 版税计算方法为图书定价×实际销售册数×版税税率。

一次性付酬: 稿酬=稿酬标准(按每千字计)×出书千字数, 一次付清。

外版书翻译稿酬: 支付方式同一次性付酬。

8. 图书出版后, 您所需参与的事情

图书出版后请您定期关注China-pub (www.china-pub.com)、Dearbook (www.dearbook.com) 等网络书店的译者反馈意见, 帮助读者解答图书内容和技术问题。

另外, 我们的编辑会向您提供相关反馈, 并会组织一些网络宣传、读者座谈会、新书发布式、有奖书评等活动。这些都需要您的参与和配合。

目 录

序言 前言

第 1 章 Marc 程序概况	1
1.1 MSC 公司与 Marc	1
1.1.1 被 MSC 收购之前的 Marc 公司	1
1.1.2 被 MSC 收购之后的 Marc 公司	2
1.2 Marc 的产品	2
1.2.1 Mentat	2
1.2.2 Marc	3
1.3 Marc 程序结构的特点	3
1.3.1 单元库	4
1.3.2 功能库	5
1.3.3 分析库	6
1.3.4 材料库	7
1.4 Marc 安装后的有关目录	8
1.5 软件文档	9
1.6 Marc 的文件系统	10
1.7 软件接口功能	10
第 2 章 Marc 基本求解过程	11
2.1 线弹性有限元法的基本步骤	11
2.2 非线性的分类及有限元法的 基本流程	13
2.3 非线性方程组的求解方法	14
2.4 非线性迭代的收敛判据	16
2.5 单元的使用方法及数值积分	17
2.6 Marc 软件的运行	19
2.7 Job 文件的数据构成	21
2.8 求解器	24
2.9 内存分配和空间需求	25
第 3 章 Mentat 常用菜单	28
3.1 概述	28

3.1.1 Mentat 与 Marc 程序的关系	28
3.1.2 Mentat 程序的屏幕布局	28
3.1.3 Mentat 与用户的通信	29
3.2 主菜单	31
3.3 静态菜单	31
3.3.1 UTILS 菜单	32
3.3.2 FILES 菜单	33
3.3.3 PLOT 菜单	34
3.3.4 VIEW 菜单	36
3.3.5 HELP 菜单	37
3.4 前处理	38
3.4.1 MESH GENERATION (网格生成)	38
3.4.2 列表键菜单	39
3.4.3 GEOMETRY PROPERTIES (几何性质定义)	40
3.4.4 MATERIAL PROPERTIES (材料性质定义)	41
3.4.5 CONTACT (接触定义)	44
3.4.6 INITIAL CONDITIONS (初始条件定义)	47
3.4.7 BOUNDARY CONDITIONS (边界条件定义)	48
3.4.8 SELECT (选择集的定义)	50
3.4.9 TABLES (表格的定义)	52
3.5 分析	54
3.5.1 载荷工况的定义	54
3.5.2 作业参数的定义并提交运行	58
3.6 后处理	63
第 4 章 Mentat 几何建模与网格生成	66
4.1 概述	66
4.2 单元类别及质量评定	66
4.2.1 单元的类别	66
4.2.2 单元质量的评定	67

4.2.3 Mentat 的网格生成工具	67	5.8 塑性应变	118
4.3 单元的直接定义	68	5.9 输出到.OUT 文件	118
4.4 几何建模	70	5.9.1 单元应力、应变	118
4.4.1 控制点的生成	70	5.9.2 反作用力	121
4.4.2 线的生成	70	5.9.3 连续单元节点力输出	121
4.4.3 面的生成	71	5.9.4 特征值的文件输出结果	121
4.4.4 实体的生成	72	5.9.5 接触分析输出	122
4.5 用映射法生成网格与操作示范	73	5.9.6 迭代求解器迭代输出	123
4.6 自动生成网格	73	5.9.7 用户子程序	123
4.6.1 Mentat 几何定义	74	5.9.8 其他	123
4.6.2 Mentat 几何修复	74	5.10 结果的其他说明	124
4.6.3 设置种子点	78	5.11 后处理的一些特殊功能	125
4.6.4 ADVANCING FRONT 四边形、 三角形单元生成器	79	5.11.1 创建动画 AVI 文件	125
4.6.5 DELAUNAY 三角形单元 生成器	80	5.11.2 流线图及粒子流动图	125
4.6.6 Overlay 覆盖网格生成技术	81	5.11.3 应变能	126
4.6.7 Patran 曲面网格划分器	81	第 6 章 单元类型的选择	127
4.6.8 四面体单元生成器	81	6.1 概述	127
4.6.9 六面体单元生成器	83	6.2 实体单元	128
4.7 Mentat 的其他网格处理功能	84	6.3 梁单元	133
4.8 例题	92	6.3.1 单元分类	133
4.8.1 圆面网格划分	92	6.3.2 Marc 截面方向和截面定义	133
4.8.2 哑铃型截面网格划分	95	6.3.3 梁单元的截面偏置	136
4.8.3 自动划分生成三维体网格	98	6.3.4 Mentat 几何特性定义	137
第 5 章 Marc/Mentat 结果输出	106	6.4 壳单元	138
5.1 概述	106	6.5 特殊单元	139
5.2 单位一致性	106	第 7 章 线弹性静力分析	142
5.3 有限元应力计算	107	7.1 二维平面结构线弹性静力 分析实例	142
5.3.1 Mentat 中的外插法/平均法	107	7.2 梁结构线弹性静力分析实例	146
5.3.2 应力轴系统	108	7.3 板壳结构线弹性静力分析实例	150
5.3.3 高斯点结果	108	7.4 三维实体结构线弹性静力 分析实例	155
5.3.4 连续和广义应力	108	第 8 章 材料本构关系	164
5.3.5 应力结果类型	111	8.1 综述	164
5.4 材料轴定义	114	8.2 弹性与弹塑性	164
5.5 复合材料失效指标	116	8.2.1 概述	164
5.6 I-DEAS/Hypermesh/ADAMS 结果输出	116	8.2.2 弹性材料行为	164
5.7 完全或更新拉格朗日求解结果	117	8.2.3 弹塑性材料行为	166

8.2.4 塑性求解过程和列式	171	9.2.1 几何非线性的应变度量	214
8.2.5 利用 Marc/Mentat 进行 弹塑性分析	171	9.2.2 几何非线性的应力度量	215
8.3 蠕变分析	172	9.2.3 非线性有限元的 Lagrange 格式	217
8.3.1 概述	172	9.3 屈曲分析	219
8.3.2 蠕变现象	172	9.3.1 屈曲分析分类	219
8.3.3 本构方程	172	9.3.2 线性屈曲分析	220
8.3.4 求解过程	173	9.3.3 非线性屈曲分析	222
8.3.5 利用 Marc 求解蠕变问题	174	9.4 失稳路径的弧长法	223
8.4 橡胶材料特性的分析	176	9.4.1 增量加载方式	223
8.4.1 概述	176	9.4.2 弧长法	224
8.4.2 弹性体的宏观行为	176	9.5 材料非线性与屈曲/失稳分析	227
8.4.3 Mooney 材料	177	9.5.1 材料非线性与几何非线性	228
8.4.4 Rivlin 表达式	178	9.5.2 包含材料非线性的、 屈曲分析	229
8.4.5 Ogden 模型	179	9.6 例题	230
8.4.6 在应力函数中采用 Lagrange 乘子	180	9.6.1 轴对称圆筒的线性屈曲分析	230
8.4.7 用 Marc 程序进行弹性体 材料分析	180	9.6.2 压杆的扰动分析	234
8.5 各向异性行为与复合材料结构	180	9.6.3 部分球壳受外压的失稳 路径分析	238
8.5.1 Marc 中的各向异性 材料模型	180	第 10 章 接触分析	243
8.5.2 失效准则	183	10.1 综述	243
8.6 材料试验曲线拟合	184	10.1.1 接触问题的描述方法	243
8.6.1 概述	184	10.1.2 Marc 软件提供的 接触算法	244
8.6.2 材料试验	184	10.1.3 接触算法的基本流程	244
8.6.3 读入数据	185	10.2 接触体的定义和运动描述	245
8.6.4 采用基于不变量应变能函数 拟合数据	186	10.2.1 可变形接触体的定义	245
8.7 采用 Rebar 单元模拟加强筋	189	10.2.2 刚性接触体的定义	247
8.8 例题	190	10.2.3 允许传热分析的刚性 接触体的定义	248
8.8.1 厚壁筒的弹塑性分析	190	10.2.4 刚体运动描述	248
8.8.2 材料试验曲线拟合	195	10.2.5 描述刚体运动的初始条件	250
8.8.3 复合材料皮带的渐进 失效分析	199	10.3 接触探测	250
8.8.4 钢筋混凝土梁的受力分析	206	10.3.1 接触容限	250
第 9 章 几何非线性与屈曲分析	213	10.3.2 偏斜系数	251
9.1 综述	213	10.3.3 接触检查顺序	252
9.2 几何非线性问题的有限单元法	214	10.4 施加接触约束以及修改 接触约束	253

10.4.1 刚体与变形体之间的 接触约束	253	11.5 谱响应分析	292
10.4.2 变形体与变形体的 接触约束	253	11.5.1 基于谱密度的大地运动	292
10.4.3 接触约束的满足与接触体 定义顺序的关系	254	11.5.2 刚体基运动引起的 结构激励	294
10.5 模拟摩擦	254	11.5.3 利用 Marc 程序进行谱 响应分析	297
10.5.1 滑动库仑摩擦模型	255	11.6 线性动力瞬态分析	297
10.5.2 剪切摩擦	256	11.6.1 线性动力学分析基础	298
10.5.3 粘-滑摩擦模型	257	11.6.2 直接积分方法	298
10.5.4 双线性摩擦模型	257	11.6.3 模态叠加法	300
10.5.5 其他摩擦模型	258	11.6.4 精度和稳定性	301
10.5.6 关于摩擦的其他说明	258	11.6.5 时间步长的选择	301
10.6 模拟分离	258	11.6.6 采用 Mentat 进行线性瞬态 分析的前处理	302
10.7 其他接触功能	259	11.7 非线性瞬态分析	302
10.7.1 粘合	259	11.7.1 非线性方程的直接积分	303
10.7.2 释放	260	11.7.2 塑性的影响	304
10.7.3 过盈检查/过盈闭合量设置	260	11.7.3 几何非线性	304
10.7.4 对称平面	261	11.7.4 非线性加载和边界条件	304
10.8 循环对称	261	11.7.5 精度和稳定性	305
10.9 例题	262	11.7.6 利用 Marc 和 Mentat 进行 非线性瞬态分析	305
10.9.1 橡胶管受压分析	262	11.8 悬臂梁特征频率分析	306
10.9.2 厚壁圆筒套装过盈分析	268	11.9 方板简谐分析	310
10.9.3 滑轮与皮带的接触分析	276	11.10 三维框架谱响应分析	315
第 11 章 动力学分析	285	第 12 章 温度场分析和热应力 分析	322
11.1 综述	285	12.1 综述	322
11.2 特征值问题	285	12.2 热传导分析的有限元法	322
11.2.1 数学列式	286	12.2.1 热传导问题的数学描述	322
11.2.2 求解特征值的数值技术	286	12.2.2 热传导问题的有限元法	324
11.2.3 刚体模态	288	12.2.3 非线性热传导分析的 收敛判定	326
11.3 简谐分析	289	12.3 用 Marc/Mentat 实施传热分析	330
11.3.1 复数算式	289	12.3.1 Marc 热传导分析的 几大特色	330
11.3.2 采用 Marc/Mentat 进行 简谐分析	289	12.3.2 常规热传导分析流程	330
11.4 阻尼模型	290	12.4 热应力分析	333
11.4.1 减振器及粘性阻尼	290	12.4.1 热应力分析的有限元描述	333
11.4.2 模态阻尼	291		
11.4.3 瑞利阻尼	291		
11.4.4 数值阻尼	292		

12.4.2	热应变	334	13.5.1	热-电耦合的有限元描述	390
12.4.3	用 Marc/Mentat 完成热应力 分析	334	13.5.2	用 Marc 进行的热-电耦合 分析流程	391
12.5	热机耦合分析	336	13.5.3	焦耳生热分析实例	393
12.6	例题	339	13.6	热-电-磁耦合分析	400
12.6.1	具有内部涂层的厚壁容器 热弹性分析实例	339	13.6.1	热-电-磁耦合分析原理	400
12.6.2	空腔容器热辐射分析	353	13.6.2	用 Marc 进行热-电-磁耦合 分析的流程	400
12.6.3	受钢块挤压的铝环的热机 耦合问题	359	13.6.3	热-电-磁耦合分析实例	401
第 13 章	电磁场分析	368	第 14 章	网格自适应与重划分	412
13.1	综述	368	14.1	综述	412
13.2	静电场分析	368	14.2	误差准则	412
13.2.1	静电场分析方程	368	14.3	单元网格细化对策	416
13.2.2	静电场分析单元	369	14.4	网格重划分	418
13.2.3	2-D 静电场分析实例	370	14.5	网格重划分分析实例	420
13.3	静磁场分析	373	14.6	Pre-State 功能实例	428
13.3.1	静磁分析的方程	373	第 15 章	连接	445
13.3.2	静磁场分析单元	375	15.1	概述	445
13.3.3	2-D 静磁场分析实例	375	15.2	节点连接	445
13.4	电磁场分析	379	15.3	伺服连接	447
13.4.1	瞬态电磁分析列式	379	15.4	弹簧/阻尼	447
13.4.2	简谐电磁分析列式	380	15.5	RBE2/RBE3	448
13.4.3	电磁场分析单元	381	15.6	例题	449
13.4.4	电磁场耦合分析实例	381	15.6.1	杆-弹簧系统分析	449
13.5	热-电耦合及焦耳生热-结构 耦合分析	390	15.6.2	“吊桥”装置分析	453
			参考文献		463

第 1 章

Marc 程序概况

1.1 MSC 公司与 Marc

Marc/Mentat 是国际上通用的最先进的非线性有限元分析软件,它是 MSC Software Cooperation (简称 MSC) 公司的产品。MSC 公司创建于 1963 年,总部设在美国洛杉矶,是享誉全球的最大的工程校验、有限元分析和计算机仿真预测应用软件 (CAE) 供应商,也是世界最著名、最权威、最可靠的大型通用有限元软件 MSC Nastran 的开发者。40 多年来, MSC 公司始终领导着世界 CAE 领域的发展方向。其产品作为世界公认的 CAE 工业标准,覆盖了工程仿真分析的各个方面,用户遍及世界 100 多个国家和地区的主要设计制造工业公司和研究机构。

自 1983 年上市以来, MSC 公司通过并购重组,迅速壮大。MSC 公司先后于 1989 年收购美国流体 CAE 软件公司 Pisces International, 1991 年和 1994 年收购了著名 CAD 供应厂商 Aries Technology 公司和当时世界第二大 CAE 厂商 PDA 公司, 1998 年收购了机构动力学仿真软件公司 Knowledge Revolution。1999 年 6 月, MSC 公司又收购了世界顶尖非线性 CAE 软件公司 Marc, 逐步奠定了其在高端、中端的线性和非线性 CAE 市场中无可争议的霸主地位。

1.1.1 被 MSC 收购之前的 Marc 公司

原 Marc 公司, 全称 Marc Analysis Research Corporation, 总部设在美国加州的 Palo Alto, 是全球第一家非线性有限元软件公司。创始人是美国著名的布朗大学应用力学系教授、有限元分析的先驱 Pedro Marcal。Marc 公司在创立之初便独具慧眼, 瞄准非线性分析是未来分析发展的必然趋势, 致力于非线性有限元技术的研究、非线性有限元软件的开发、销售和售后服务。对于学术研究机构, Marc 公司的一贯宗旨是提供高水准的 CAE 分析软件及灵活的二次开发环境, 支持大学和研究机构完成前沿课题研究。对于广阔的工业领域, Marc 软件提供先进的虚拟产品加工过程和运行过程的仿真功能, 帮助市场决策者和工程设计人员进行产品优化和设计, 解决从简单到复杂的工程应用问题。经过三十余年的不懈努力, Marc 软件得到了学术界和工业界的大力推崇和广泛应用, 建立了它在全球非线性有限元软件行业的领导者地位。

回顾 Marc 软件的开发历程, Marc 在非线性有限元软件的开发道路上留下了坚实的足迹。20 世纪 80 年代以前, 受有限元分析方法和计算机速度的双重局限, 有限元分析主要处理小规模的线性问题。以非线性有限元分析为主导的 Marc 软件, 在工业发达国家的航空、航天、能源和核电行业的蠕变、塑性等金属材料非线性问题分析中大显身手。20 世纪 80 年代后, Marc 软件的开发面向准确模拟高度非线性聚合物等非金属材料特性, 在材料库中增加了多种弹性体类材料模型。Marc 软件因此被全球各著名轮胎公司用于轮胎设计。为满足制造业中大量的加工工艺仿真所

必需的接触分析的需求, Marc 继而开发出了使用简单、精度高、收敛快的接触算法。为使功能强大的分析软件易于使用, 早在 1981 年, Marc 便推出并完善了面向用户的非线性有限元分析的图形用户界面。进入 20 世纪 90 年代后, 随着计算机软硬件的飞速发展, 以及非线性有限元分析方法的日趋完善, 用 Marc 处理的有限元分析已从小规模线性问题转向大规模非线性分析, 从单个物理场分析转向多种物理场之间耦合的大规模非线性分析。Marc 软件对计算机资源的利用也从单 CPU 跨越到多 CPU 并行, 这使得对大型复杂非线性系统实施更细、更精、更快的分析成为现实。

随着 Marc 软件功能的不断扩展, 软件的应用领域也从开发初期的核电行业迅速扩展到国防、航空、航天、汽车、造船、铁道、石油化工、能源核电、电子元件、机械制造、材料工程、土木建筑、医疗器材、冶金工艺和家用电器等行业, 成为许多知名公司和研究机构研发新产品和新技术的必备工具。

Marc 公司一贯倡导用非线性有限元技术更为准确地模拟真实的自然现象, 解决从简单到复杂的工程实际问题。自 1971 年推出第一个版本以来, Marc 公司的产品已历经几十次的版本升级。每一次版本的更新都溶入了当时最先进的非线性有限元分析技术和成熟的工程经验, 这使 Marc 软件具有顶强大的竞争力。

Marc 公司注重产品质量, 对软件制定和实施了一整套严密和完善的质量保证体系。在公司全体员工的不努力下, 1998 年 Marc 软件通过了 ISO9001 质量认证。在我国, Marc 通过了全国压力容器标准化技术委员会的严格考核和认证, 成为按压力容器分析设计标准 JB4732—1995 进行分析设计的有限元分析软件。

在被 MSC 收购之前, Marc 公司在全球设有 26 家分公司和办事处, 用户遍及世界 100 多个国家和地区。1995 年 9 月 Marc 公司在北京开设办事处, Marc 进入中国市场的短短几年, 得到广大客户的积极回应和支持。

1.1.2 被 MSC 收购之后的 Marc 公司

收购 Marc 后, MSC 调整了全球组织结构。在亚太地区, MSC 公司将前 Marc 亚太总部合并入 MSC 亚太总部, 将 Marc 北京办事处合并入 MSC 北京办事处, 有关业务同时并入 MSC 中国的相应办事处。

对 Marc 公司的收购完成后, MSC 公司对前 Marc 公司的产品进行了整合, 使其融入 MSC 的现有产品线。MD Nastran 已集成了 Marc 的大部分功能, 作为其重要的非线性模块之一的 SOL600, 可以实现与其他模块的联合仿真和多学科求解。为满足中国学术界和工业界客户的各种需求, MSC 公司将不断设计、开发、测试和销售功能先进、质量可靠的高级非线性有限元分析软件, 并提供高水平、专业化的技术支持和售后服务。

1.2 Marc 的产品

Marc 被 MSC 收购后, 保留了以下主要产品: Marc 是高级非线性有限元分析模块, Mentat 是 Marc 的前后处理图形对话界面。两者严密整合的 Marc 和 Mentat 成为解决复杂工程问题、完成学术研究的高级通用有限元软件。Marc AutoForge (更名为 MSC SuperForm, 已并入 Marc) 是 2D 和 3D “锻造成型”的仿真软件。

1.2.1 Mentat

Mentat 是新一代非线性有限元分析的前后处理图形交互界面, 与 Marc 求解器无缝连接。它

具有以 ACIS 为内核的一流实体造型功能；全自动二维三角形和四边形、三维四面体和六面体网格自动划分建模能力；直观灵活的多种材料模型定义和边界条件的定义功能；分析过程控制定义和递交分析、自动检查分析模型完整性的功能；实时监控分析功能；方便的可视化处理计算结果能力；先进的光照、渲染、动画和电影制作等图形功能。并可直接访问常用的 CAD/CAE 系统，如：ACIS、AutoCAD、C-MOLD、IGES、MSC Nastran、MSC Patran、IDEAS、VDAFS、STL、ABAQUS 等。

1.2.2 Marc

Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件的求解器，体现了 40 多年来有限元分析的理论方法和软件实践的完美结合。它具有极强的结构分析能力，可以处理各种线性 and 非线性结构分析。它提供了丰富的结构单元、连续单元和特殊单元的单元库。Marc 的结构分析材料库提供了模拟金属、非金属、聚合物、岩土、复合材料等多种线性和非线性复杂材料特性的材料模型。分析采用具有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术。为了进一步提高计算精度和分析效率，Marc 软件提供了多种功能强大的加载步长自适应控制技术，可自动确定分析加载步长。Marc 卓越的网格自适应技术以多种误差准则自动调节网格疏密，既保证了计算精度，同时也使非线性分析的计算效率大大提高。此外，Marc 支持全局自动网格重划，用以纠正过渡变形后产生的网格畸变，确保大变形分析的继续进行。

对非结构的场问题，如包含对流、辐射、相变潜热等复杂边界条件的非线性传热问题的温度场，以及流场、电场、磁场，提供了相应的分析求解能力；并具有模拟流—热—固、土壤渗流、声—结构、电—磁、电—热以及热—结构等多种耦合场的分析能力。

为满足高级用户的特殊需要和进行二次开发，Marc 提供了方便的开放式用户环境。这些用户子程序入口几乎覆盖了 Marc 有限元分析的所有环节，从几何建模、网格划分、边界定义、材料选择、分析求解到结果输出，用户都能够访问并修改程序的默认设置。在 Marc 软件的原有功能框架下，用户能够极大地扩展 Marc 有限元软件的分析能力。

Marc 除了支持单 CPU 分析外，还具有在 Windows (32 位或 64 位) 或 UNIX 平台上的多 CPU 或多网络节点环境下实现大规模并行处理的功能。Marc 基于区域分解法的并行有限元算法，能够最大限度地实现有限元分析过程中的并行化，并行效率可达准线性甚至线性或超线性。Marc 并行处理的超强计算能力可为虚拟产品运行过程和加工过程提供更快、更细、更准的仿真结果。

1.3 Marc 程序结构的特点

Marc 是基于位移法的有限元程序，在非线性方面具有强大的功能。程序按模块化编程，工作空间可根据计算机内存大小自动进行调整。用户如果对精度要求较高，可选用双精度进行运算。当单元数、节点数太多，内存不能满足需要时，程序能够自动利用硬盘空间进行分析。在分析过程中，利用网格自适应和重划分技术，能够变更单元的划分和节点数目。

Marc 对于非线性问题采用增量解法，在各增量步内对非线性代数方程组进行迭代以满足收敛判定条件。根据具体分析的问题可采用不同的分析方法，如对于弹塑性分析和大位移分析可采用切线刚度法，对于蠕变分析或热应力分析可采用初应变法。

单元刚度矩阵采用数值积分法生成。连续体单元及梁、板、壳单元的面内区域采用高斯积分法，而梁、板、壳单元厚度方向则采用任意奇数个点的 Simpson 积分法。应变-位移函数根据高斯点来评价。程序计算并存储单元所有积分点或单元中心点的应力、应变、温度等。总刚度矩阵、

总质量矩阵等采用轮廓或稀疏存储法存储。

输入数据可借助于 Mentat 界面生成,由用户填卡也可生成。输入数据文件由 4 部分组成,其中分析功能的指示由参数选项组确定,分析模型的内容由模型定义选项组确定,增量步数据由历程定义选项组确定,图形输出由绘图定义选项组确定。

Marc 程序拥有许多对用户开放的子程序即用户子程序,用户可以根据各自需要用 Fortran 语言编制用户子程序,实现对输入数据的修改、材料本构关系的定义、载荷条件、边界条件、约束条件的变更,甚至扩展 Marc 程序的功能。

Marc 程序拥有以下 4 个库:单元库、功能库、分析库、材料库。用 Marc 软件分析的每一个实际问题,都采用了这 4 个库的一种以上的元素。用户可根据各种具体的结构分析进行适当的选择,下面简单介绍一下这 4 个库。

1.3.1 单元库

Marc 的单元库提供了 180 余种单元,除了少部分单元外,其他单元均可用于线性和非线性分析,分析中单元数和单元类型可自由选择,不同类型的单元可组合使用,如连接出现不协调,可用 Marc 提供的多种标准连接约束来保证单元间的一致性。四边形单元可以退化成三角形单元,六面体单元可以退化成五面体、四面体单元。

Marc 单元库的主要单元包括:

- 杆单元: 2 节点或 3 节点的三维杆单元。
- 薄膜单元: 4 节点或 8 节点的三维等参薄膜单元,常与梁单元或杆(truss)单元组合运用。
- 连续体单元: 包括模拟平面应力、平面应变、广义平面应变、轴对称和三维实体的各类单元。
- 梁单元: 2 节点或 3 节点的二维、三维梁单元,模拟直梁、曲梁和桁架结构或用作板壳结构的加强筋。
- 板单元: 线性壳单元(单元类型 49、72、75、138 或 140)或二次单元(单元类型 22)可以有效地模拟板。
- 壳单元: MSC.Marc 提供了三种基于 Koitor-Sanders 壳理论的 C1 型等参双曲薄壳单元,也提供了基于离散的基尔霍夫理论的半 loof 单元。厚壳单元采用 Mindlin 板单元。此外,对轴对称壳提供了轴对称壳单元。
- 传热分析单元: 包括三维杆(link)单元、平面和轴对称单元、平面和轴对称半无限元、六面体元/四面体元、半无限块体单元、轴对称或空间壳体单元。热传导单元可用于耦合的热-电(焦耳发热)问题。
- 声场分析单元: 采用传热分析单元,自由度为压力。
- 静电场分析: 传热分析单元,自由度为电压。
- 电-结构耦合单元: 采用应力单元。
- 流/固耦合单元: 采用传热分析单元,自由度为静水压力。
- 滑动轴承分析: 传热分析单元,自由度为压力。
- 磁场分析: 专用单元,自由度为三个方向的磁势。
- 电磁场分析单元: 专用单元,包括平面应力、平面应变、轴对称和三维实体单元。
- 土壤分析: 解耦的孔隙压力用传热单元分析,解耦的土壤分析用结构单元分析,耦合的土壤分析用不可压 Herrmann 单元。