

万水MSC技术丛书

MSC Software

新界面 新功能 新样例

全新 Marc

实例教程与常见问题解析

(第二版)

孙丹丹 陈火红 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 MSC 技术丛书

全新 Marc 实例教程与常见问题解析 (第二版)

孙丹丹 陈火红 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书主要介绍 MSC 公司的 Marc/Mentat 在线性、非线性有限元分析领域的应用和操作方法。特别是针对 Marc/Mentat 2015 以及近年来新增的一些功能进行详细介绍,使初学者能够很快的熟悉和掌握使用 Marc/Mentat 进行非线性问题建模和求解的方法,与此同时针对一些典型案例结合 Marc 的最新功能和操作界面进行介绍,方便用户更快、更好地了解 Marc 的新功能并应用于实际设计工作中。

本书大部分案例来自于实际工程项目,不仅包含了具体操作步骤的讲解,还配以图片说明,方便用户即学即用。全书共分 9 章,包括 Marc 的主要功能以及近年来 Marc/Mentat 新增的功能亮点;线性和非线性有限元求解的基本理论背景知识;Marc Mentat 常用菜单,重点介绍 Marc Mentat 2015 的 CAD 模型导入、特征识别和修改以及实体结构自动分网;针对 Marc 处理材料非线性、几何非线性、接触非线性以及断裂力学、网格重划分等关键技术进行了重点介绍。通过本书的学习,读者可以掌握通过有限元法解决实际工程问题的思路和方法,结合实际工程应用实例,将理论和工程分析结合的更为紧密。本书附赠光盘带有全部例题的模型文件和操作动画。

图书在版编目(CIP)数据

全新Marc实例教程与常见问题解析 / 孙丹丹, 陈火红编著. — 2版. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 10

(万水MSC技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4854-1

I. ①全… II. ①孙… ②陈… III. ①有限元分析—应用软件 IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第264280号

责任编辑: 杨元泓 张玉玲 加工编辑: 韩莹琳 封面设计: 李 佳

书 名	万水 MSC 技术丛书 全新 Marc 实例教程与常见问题解析 (第二版) QUANXIN Marc SHILI JIAOCHENG YU CHANGJIAN WENTI JIEXI
作 者	孙丹丹 陈火红 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河市铭浩彩色印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 26 印张 643 千字
版 次	2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	72.00 元 (附 1 张 DVD)

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

再版前言

Marc 作为世界上第一个商用非线性有限元分析软件, 诞生于 20 世纪 70 年代初。经过四十多年的发展, Marc 已经广泛的应用于航空、航天、汽车、造船、机械制造、能源、电子、土木工程、铁路运输、水利等各个行业。成为世界上很多知名企业必备的分析工具。

从 2011 年开始, MSC 公司每年都会推出 1~2 个 Marc 的新版本。近年来, Marc 不仅在功能上有重大的改进。在界面风格上也持续不断的完善。Marc Mentat 2015 在保持友好的全新界面风格的同时, 还具备了功能强大的模型浏览器功能, 使初学者能够很快地熟悉和灵活使用新界面的诸多便利功能。为满足用户的使用需求, 新的界面风格还增加了中文操作界面, 中文和英文界面之间的切换只需简单修改一个语言参数即可。在与各商用 CAD 软件的接口设置上, Marc Mentat 2015 进一步增强了 CAD 实体的导入和特征识别功能, 极大地方便了用户进行各种复杂几何类型的模型导入、特征编辑等。另外在网格划分功能上引入了新的实体网格自动划分方法, 使得用户在更短的时间内建立网格质量更高的模型。为使广大新老用户更好地了解 Marc 的新功能、掌握和使用 Marc, MSC 公司投入了大量的人力搜集和整理近年来 Marc 的一些新功能以及在各行业的应用, 最终再版了这本新的、有特色的、能够系统介绍 Marc Mentat 使用方法的简明实用的文献资料。

本书介绍了 Marc Mentat 软件在各个领域的基本理论和使用方法。全书共分 9 章: 根据有限元分析的基本流程, 介绍了 Marc 的基本概念和分析流程, 以及从网格划分、材料定义、边界条件以及分析参数设置, 到结果后处理, 以通俗易懂的语言和简明的实例介绍了使用 Marc 进行有限元线性、非线性分析的基本流程和使用方法。

- 第 1 章 Marc Mentat 简介, 介绍 Marc 的发展历史、主要功能、安装方法、帮助文档等, 使读者对软件有一个初步的认识, 另外针对近年来 Marc Mentat 新增功能亮点进行简单的介绍;
- 第 2 章为 Marc Mentat 图形用户界面和操作, 介绍了 Marc Mentat 的全新界面风格、模型浏览器的使用以及中文界面的启动, 对 Marc Mentat 的一些主要菜单和常用命令进行了全面的介绍;
- 第 3 章为 Marc Mentat 几何建模与网格生成, 详细介绍了 CAD 模型的导入功能、CAD 导入过程中以及导入到 Mentat 后的特征识别和特征删除与修改、实体网格自动划分等, 结合球轴承实际结构进行实体模型导入、特征识别、特征修改、实体自动分网等操作方法和流程的详细说明;
- 第 4 章为 Marc Mentat 材料非线性分析, 介绍各类常用的金属和非金属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, 并就近年来新增的材料模型进行了重点介绍;
- 第 5 章为接触分析, 介绍接触问题分析方法和过程, 针对复杂模型的接触设定工作量大、易出错等问题重点介绍了新增的接触关系设置方法, 帮助用户更高效地完成接触体、接触表等的定义, 针对工程实际经常遇到的套管和管内梁接触分析以及常

见的金属结构拉延分析进行了实例讲解;

- 第6章为 Marc Mentat 结果输出, 介绍 Marc 的结果输出类型、含义等, 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, 最后介绍近年来 Marc 在后处理方面的一些新的功能亮点;
- 第7章为 Marc Mentat 网格自适应与重划分, 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体会 Marc 中颇具特色的网格自适应和网格重划分的功能, 通过实例详细介绍了新增的局部网格尺寸控制的几种方法;
- 第8章为断裂力学问题的 Marc 解决方案, 介绍断裂力学问题在 Marc 中的模拟方法, 通过实例介绍复合材料失效分析、脱层分析、界面单元的建模方法和参数设置, 以及裂纹扩展的仿真计算流程, 结合实例介绍了初始裂纹创建、裂纹扩展以及高周疲劳裂纹扩展的建模和分析方法;
- 第9章为 Marc-Adams 联合仿真, 介绍了包含非线性问题的系统级结构分析模型采用 Marc-Adams 联合仿真的基本原理、工作流程和方法, 并结合实例详细说明了 Marc-Adams 进行联合仿真时的模型设置方法、注意事项以及结果查看等内容。

读者可根据自己的需要对本书的内容进行有选择的阅读。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, 对书中的所有的例子都配有整个操作过程的动画。读者可以边操作边看动画。

由于编者水平有限, 书中缺点和谬误难免, 敬请读者批评指正, 也欢迎用户和读者通过电子邮件方式与编者共同探讨一些具体的软件使用问题。编者的电子邮箱分别为: dandan.sun@mscsoftware.com、huohong.chen@mscsoftware.com。

编者

目 录

再版前言

第 1 章 Marc/Mentat 简介	1
1.1 MSC 公司与 Marc	1
1.2 Marc 程序结构框架	3
1.2.1 Mentat 与 Marc 的关系	3
1.2.2 Marc 一般分析流程	4
1.3 Marc 新增功能的亮点	6
1.3.1 Mentat 2015 及其近年来的新功能	7
1.3.2 Marc 2015 及其近年来的新功能	17
1.4 Marc 2015 的帮助文档	34
1.5 Marc 2015 安装	36
第 2 章 Marc Mentat 2015 图形用户界面和 操作	42
2.1 概述	42
2.2 启动图形用户界面 (Mentat GUI)	42
2.3 Mentat 2015 图形交互界面的布局和组成	44
2.3.1 新界面风格与经典界面的异同	44
2.3.2 中文界面介绍	45
2.3.3 Mentat 2015 常用功能图标介绍	46
2.3.4 Mentat 2015 主菜单介绍	47
2.3.5 模型浏览器介绍	47
2.4 File 下拉菜单	52
2.5 Select 下拉菜单	54
2.5.1 Selection Control——选取控制	54
2.5.2 Set Control——集合控制	58
2.6 View 下拉菜单	59
2.7 Tools 下拉菜单	60
2.7.1 Procedures	60
2.7.2 Python	61
2.7.3 .Net Modules	61
2.7.4 Parameters	62
2.7.5 Aliases	62
2.7.6 Annotations	62
2.7.7 Generalized XY Plot	62

2.7.8 Animation	63
2.7.9 Rendering	63
2.7.10 Edit File	64
2.7.11 List Directory	64
2.7.12 System Command	64
2.7.13 System Shell	64
2.7.14 Distance	64
2.7.15 Angle	64
2.7.16 Calculations	64
2.7.17 Calculate	65
2.7.18 Sample Element	65
2.7.19 Program Settings	65
2.7.20 Menu Font	65
2.7.21 Window/ Popup Settings	65
2.8 Window 下拉菜单	65
2.9 Help 下拉菜单	67
2.10 辅助功能图标	68
2.11 Mentat 的常用快捷方式	69
第 3 章 Marc Mentat 几何建模与网格生成	70
3.1 概述	70
3.1.1 与有限元分析相关的常用词	70
3.1.2 与几何实体相关的常用词	70
3.2 几何模型导入	71
3.2.1 MentatCAD 接口功能的历史回顾	71
3.2.2 Mentat 最新 CAD 接口功能 ——General CAD as Solids	72
3.2.3 CAD 模型的特征识别和特征编辑	78
3.3 Mentat 中几何建模和生成网格	81
3.3.1 格栅的使用	82
3.3.2 Geometry (几何要素的生成和编辑)	83
3.3.3 Mesh (生成网格)	86
3.3.4 模型长度单位设置	88
3.4 Pre-Automesh: 自动分网预处理	90

3.4.1	Check/Repair Geometry: 几何 检查/修复	90	4.2.3	例题: 带孔壁架的弹塑性分析	133
3.4.2	Curve Divisions (设置种子点)	93	4.2.4	Marc 新增各向异性塑性材料模型 介绍	134
3.4.3	Solid Mesh Seed: 实体网格种子点	95	4.3	橡胶材料特性的分析	137
3.5	Automesh: 自动分网	96	4.3.1	概述	137
3.5.1	Curves: 曲线分网	96	4.3.2	Marc 中的超弹性材料本构模型	138
3.5.2	Planar: 平面实体分网	97	4.3.3	用 Marc 程序进行弹性体材料分析	141
3.5.3	Surface 曲面网格划分	99	4.3.4	例题: 弹性橡胶拱的力与位移响应 分析	141
3.5.4	Volumes: 全新实体网格划分	100	4.3.5	Marc 中新增超弹性材料模型	142
3.5.5	二维加强筋 (Rebar) 单元	107	4.3.6	包含 Payne 效应的分析例题	156
3.5.6	Tools	107	4.3.7	材料试验曲线拟合概述	168
3.6	转换法生成网格	109	4.3.8	采用 Marc 进行试验曲线拟合	169
3.7	Operations: 几何和网格处理	110	4.3.9	例题: 橡胶材料的试验曲线拟合	172
3.7.1	Attach: 关联/附着	110	第 5 章	接触分析	180
3.7.2	Change Class: 单元几何拓扑种类 更改	111	5.1	综述	180
3.7.3	Check: 单元检查	112	5.1.1	接触问题的数学描述方法和数值 计算方法	180
3.7.4	Convert: 转换	112	5.1.2	Marc 软件进行接触探测及分析的 方法	181
3.7.5	Defeature: 特征删除	112	5.1.3	Marc 软件接触算法基本流程	184
3.7.6	Duplicate: 复制	112	5.2	接触体的定义和运动描述	186
3.7.7	Expand: 扩展	112	5.2.1	变形体的定义 ——Meshed (Deformable)	186
3.7.8	Intersect: 相交	113	5.2.2	刚体的定义——Geometric/Geometric (With Nodes)	190
3.7.9	Move: 移动	113	5.2.3	允许传热分析的刚体的定义 ——Meshed (Rigid)	191
3.7.10	Relax: 松弛	114	5.2.4	刚体运动控制——Body Control	191
3.7.11	Revolve: 旋转	114	5.2.5	接触体定义技巧	194
3.7.12	Solids: 实体的操作	115	5.3	模拟摩擦	195
3.7.13	Stretch	115	5.3.1	滑动库仑摩擦模型	195
3.7.14	Subdivide: 网格加密	115	5.3.2	剪切摩擦	197
3.7.15	Sweep: 清理	116	5.3.3	粘-滑摩擦模型	197
3.7.16	Symmetry: 对称	116	5.3.4	双线性摩擦模型	198
3.8	网格自动划分例题	116	5.3.5	各向异性摩擦定义	199
3.8.1	一维网格自动划分例题	117	5.3.6	其他摩擦模型	200
3.8.2	二维网格自动划分例题	121	5.4	接触关系——Contact Interactions	200
3.8.3	几何实体自动分网	123	5.4.1	粘接接触参数设置	203
第 4 章	材料非线性分析	131			
4.1	综述	131			
4.2	弹塑性分析	132			
4.2.1	概述	132			
4.2.2	利用 Marc/Mentat 进行弹塑性分析	132			

5.4.2 接触参数设置	205	Temp, 代码 59)	260
5.5 接触表——Contact Tables	209	6.6.13 等效塑性应变	260
5.5.1 接触表的定义	210	6.6.14 主应力输出	261
5.5.2 Detection Method——接触检查顺序	214	6.7 Out 文件结果输出	262
5.5.3 接触表参数设置	215	6.7.1 单元应力、应变	262
5.5.4 接触区域——Contact Area	221	6.7.2 反作用力	263
5.6 套管接触或管内梁接触	222	6.7.3 连续单元节点力输出	264
5.7 板料成形拉延筋拉延阻力的有限元预测	227	6.7.4 特征值的文件输出结果	264
第 6 章 Marc/Mentat 结果输出	240	6.7.5 接触分析输出	265
6.1 概述	240	6.7.6 迭代求解器迭代输出	266
6.2 Job Results 计算结果	240	6.8 后处理的抓图和动画功能	267
6.2.1 Job Results 菜单	240	6.8.1 图片的存储	267
6.2.2 后处理文件 (.t16/.t19) 的打开	253	6.8.2 创建动画文件	269
6.3 Model Plot	254	6.8.3 切片平面	270
6.3.1 Deformed Shape——变形形状	254	6.8.4 总体变量	272
6.3.2 Scalar Plot——标量显示	256	第 7 章 网格自适应 (Local Adaptivity) 与	
6.3.3 其他的显示	256	重划分 (Global Remesh)	274
6.4 Path Plot——路径上的结果显示	257	7.1 综述	274
6.5 History Plot——变量历程图	257	7.2 局部网格自适应	275
6.6 有限元结果类型	258	7.2.1 局部网格自适应误差准则	275
6.6.1 应力 (Stress, 代码 11-16/311)	258	7.2.2 局部网格自适应的相关技术处理	280
6.6.2 柯西应力 (Cauchy Stress, 代码		7.2.3 网格自适应实例	281
41-46/341)	259	7.3 全局网格重划分 (Global Remeshing)	288
6.6.3 特定坐标系应力 (Stress in Preferred		7.3.1 全局网格重定义相关菜单和操作	291
System, 代码 111-116/391)	259	7.3.2 全局网格重分准则定义	293
6.6.4 整体应力 (Global Stress, 代		7.3.3 网格重划分网格密度控制和设置	295
码 411)	259	7.3.4 二维网格重划分例题	303
6.6.5 缺省应力 (Default Stress)	259	7.3.5 三维网格重划分实例	314
6.6.6 Tresca 等效应力 (Tresca Intensity)	259	第 8 章 断裂力学问题的 Marc 解决方案	325
6.6.7 法向应力 (Normal Stress)	259	8.1 综述	325
6.6.8 剪应力 (Shear Stress)	259	8.2 Marc 进行失效分析	325
6.6.9 平均法向强度 (Mean Normal		8.2.1 最大应力失效准则 (MAXIMUM	
Intensity)	260	STRESS)	326
6.6.10 等效应力/等效 von Mises 应力		8.2.2 最大应变准则 (MAXIMUM	
(代码 17)	260	STRAIN)	327
6.6.11 等效应力/屈服应力 (Equivalent		8.2.3 HOFFMAN、HILL、蔡一吴	
Stress/Yield Stress, 代码 59)	260	(TSAI-WU)	328
6.6.12 等效应力/与温度相关的屈服应力		8.2.4 PUCK 失效准则	329
(Equivalent Stress/Yield Stress@Cur.		8.2.5 HASHIN、HASHIN TAPE、	

HASHIN FABRIC	329
8.2.6 应变不变量失效准则 (STRAIN INVARIANT)	329
8.2.7 渐进失效分析 (Progressive Failure Analysis)	331
8.3 断裂力学理论及有限元实现	331
8.3.1 裂纹类型	331
8.3.2 裂纹的位置	332
8.3.3 断裂力学的有限元分析方法	333
8.3.4 利用 Marc 进行断裂力学分析	335
8.4 Marc 中的虚拟裂纹闭合技术 (VCCT)	336
8.4.1 虚拟裂纹闭合技术介绍	336
8.4.2 初始裂纹创建 (Crack Initiator)	343
8.5 Marc 进行脱层分析及粘接区域建模	344
8.5.1 Marc 进行脱层分析	344
8.5.2 Marc 中的粘接区域建模	347
8.6 J 积分分析例题	350
8.7 裂纹扩展分析例题	354
8.7.1 带筋结构的裂纹扩展分析例题	354
8.7.2 初始裂纹创建	364
8.7.3 高周疲劳下的裂纹扩展	371
8.8 粘接结构分析例题 (interface)	380
第 9 章 Marc-Adams 联合仿真	391
9.1 Adams-Marc 联合仿真综述	391
9.2 Adams-Marc 联合仿真方法和步骤	394
9.2.1 Adams 模型的考虑	397
9.2.2 联合仿真的图形界面	398
9.2.3 开始联合仿真	400
9.3 Adams-Marc 联合仿真实例	402
参考文献	408

第 1 章 Marc/Mentat 简介

1.1 MSC 公司与 Marc

MSC Marc 是国际上通用的非线性有限元分析软件。它是 MSC Software Corporation (简称 MSC) 公司的产品。MSC 公司创建于 1963 年, 被誉为是从“Nastran 公司”成长为真正的市场和技术领先的模拟软件公司, 总部位于加利福尼亚州, MSC 软件公司在 23 个国家拥有超过 1000 名员工。53 年来, MSC 强大的、集成化的 VPD (Virtual Products Development, 虚拟产品开发) 软件和服务帮助企业在产品开发过程中改善产品的设计、测试、制造和服务流程, 从而更快、更高效地推出新产品, 在激烈的市场竞争中领先对手。MSC 公司作为世界领先的 VPD 技术提供商, 从创建至今, 先后于 1989 年兼并了 PISCES InternationB.V. 公司, 并推出结构和流体耦合高度瞬态非线性分析软件 MSC Dytran; 1999 年收购世界上第一个非线性有限元软件公司——Marc 公司, 并推出 MSC Marc; 2002 年收购世界最大的机构仿真软件公司——MDI 公司, 推出产品 MSC ADAMS; 2008 年收购 NETWORK ANALYSIS, INC. 公司 (SINDA/G), 拓展并推出其热分析领域产品 MSC Sinda; 2011 年收购了被认为是声学软件市场领头羊的比利时 FFT (自由声场技术) 公司, 并发布 MSC Actran 软件; 2012 年收购了高端材料仿真领域的领先厂商 e-Xstream 公司, 推出非线性多尺度材料与结构建模平台 Digimat; 2015 年收购焊接和成形模拟软件的领导者 Simufact 公司。

2011 年 MSC 软件公司被 MaximumPC 杂志评为“十大原创软件公司”, 与苹果、IBM、计算机科学公司 (Computer Science Corporation)、微软等业界领先的技术创新者并肩入围, 成为最具创新精神的软件公司之一。MSC 的产品被广泛应用于各个行业的工程仿真分析, 包括国防、航空、航天、船舶、机械制造、汽车、兵器、电子、铁道、石化、能源、材料工程、科学研究及教育等各个领域, 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, 其中覆盖了全球 92% 的机械设计制造部门、97% 的汽车制造商和零部件供应商、95% 的航空航天公司和 93% 的船舶研发部门。

原 Marc 公司始创于 1971 年, 全称 Marc Analysis Research Corporation, 是全球首家非线

性有限元软件公司, 主要产品是 Marc。

1999 年 Marc 公司被 MSC 公司收购, Marc 产品得以继续研发, 经过 40 多年的不懈努力, Marc 软件得到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。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航空、航天、汽车、造船、铁路、石油化工、能源、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领域, 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。

MSC Marc 具有处理几何非线性、材料非线性和包括接触在内的边界条件非线性以及组合的高度非线性的超强能力。材料非线性分析方面, MSC Marc 可以定义和分析包括塑性、蠕变、黏塑性、黏弹性、超弹性、超塑性、刚塑性、复合材料等问题。当一个结构的位移显著地改变其刚度时, 则应考虑几何非线性的影响。MSC Marc 程序可解决以下几何非线性效应: 大应变、大变形, 大转动, 跟随力、应力强化、屈曲。MSC Marc 在同类软件中具有最强的接触分析能力。对于基本的接触状态, MSC Marc 提供基于直接约束的接触算法, 可自动分析变形体之间、变形体与刚体之间以及变形体自身的接触。新的面段一面段 (Segment-to-Segment) 的接触探测方法, 使得两接触体在接触部位的应力分布变得非常连续。MSC Marc 还具有传统的间隙摩擦单元模式, 也可以用非线性弹簧单元来模拟非线性支撑边界。

MSC Marc 可以处理各种结构静力学、动力学 (包括模态分析、瞬态响应分析、简谐响应分析、谱响应分析) 问题、温度场分析以及其他多物理场耦合问题。其中模态分析可包含预应力模态、有阻尼模态、无约束模态、大变形模态、接触结构模态等。瞬态动力分析用于确定结构承受随时间变化载荷时的动力响应, 可以考虑 3 种不同类型的非线性的影响。简谐响应分析用于求解结构承受正弦变化载荷的响应。该分析类型用于研究随时间简谐变化载荷引起的共振问题。MSC Marc 软件具有功能强大的一维、二维、三维稳态/瞬态热传导分析能力; 能够描述各向同性、各向异性、正交各向异性的热物理参数。MSC Marc 软件提供 4 种热分析边界条件: 温度、热流强度、表面对流、表面辐射。MSC Marc 可以计算相变潜热, 具备很强的多场耦合分析功能, 支持热-机耦合分析, 可以进行有接触传热的耦合分析。

MSC Marc 拥有高数值稳定性、高精度和快速收敛的高度非线性问题求解技术。MSC Marc 卓越的网格自适应技术, 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。MSC Marc 的 Pre-state 功能可以实现多次作业连续分析, 能够将前一个分析任务的分析结果作为下一个分析任务的初始条件进行连续分析。例如, 加工成型后弹簧具有的变形和残余应力等结果可以作为后续性能分析的初始条件, 充分考虑弹簧各个加工环节对性能的影响。最新的模型部件 (Model Section) 可让用户以更方便的形式进行多阶段成形过程的链式分析。用户可以很容易将内部变量从一个模拟传递到下一个模拟、更新接触工具/模具。之前的分析结果可以重用, 因而从前一次分析得到的模型状态得以保持。采用该方法, 在多阶段模拟中避免了大量的重新启动文件, 增加了模拟的灵活性。MSC Marc 基于区域分解法的并行有限元算法, 能够最大限度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超线性。

功能完备的前后处理器 Mentat 易学易用, 其得心应手的实用工具使得 Marc 用户能够轻松愉快地进行各种模型创建和参数的定义。Mentat 自身具有三维建模能力, 并提供灵活的 CAD

图形接口及 CAE 数据接口,可以实现不同分析软件之间的数据转换。MSC Marc 支持多种平台 (Windows、Linux) 和网络浮动的许可证配置方式,各种硬件平台数据库兼容,功能一致,界面统一。

MSC Marc 软件提供了 400 多个特定功能的开放程序公共块和 200 多个用户子程序接口。用户可以不受限制地调用这些程序模块。用户子程序接口覆盖了 MSC Marc 有限元分析的所有环节,在国内外的用户中有很多成功的案例,特别是在用户自定义材料本构模型、复杂边界条件施加等方面尤为成功。MSC Marc 提供的完善的、多层次的二次开发功能,以 MSC Marc 已有程序为基础平台,可以开发出各种典型材料本构、边界条件等的分析子程序,从而形成自身的可长期持续应用和发展的分析系统。

为方便用户了解和学习 MSC Software 公司的产品,公司为不同用户提供了不同层次的、方便快捷的通道进行共享资料下载、技术支持以及各种培训课程等服务项目。用户可以登录 MSC Software 公司网站 (<http://simcompanion.mscsoftware.com>) 进行各个产品的电子文档下载,其中包括产品新闻、技术文章 (常见问题解答、案例、技术公告等)、产品信息和文档 (发布指南、硬件和软件要求等)、用户论文等;也可以查询产品已发现的问题和相应的解决方法、下载产品更新补丁及各种网络研讨会的多媒体材料。用户可以借助 SimCompanion 网站上 Support Contact Information 提供的联系方式,如网址、邮箱、电话等和当地的支持中心联系,以便得到个性化的支持。

利用 VPD 社区的论坛 (<http://forums.mscsoftware.com>),可以发布使用 MSC 公司产品时遇到的问题,并接收来自世界各地的其他用户对问题的解答。

正式用户在维护期内可以登录 MSC 公司下载中心,下载最新版本的产品安装介质 (<https://mscsoftware.subscribenet.com/>),在这里提供了针对各种硬件平台的安装介质,方便用户进行产品的安装和更新。

通过中文主页 (<http://www.mscsoftware.com.cn/index.aspx?Id=89>) 可以了解中国区各办事处的软件培训课程目录和日程表,用户可直接在网站上提交报名申请。中国区的正式用户在维护期内可以拨打技术支持热线电话 400-085-0509 寻求技术支持,或发邮件至 mscprc.support@mscsoftware.com 进行咨询。

1.2 Marc 程序结构框架

Marc 是先进的非线性分析求解器,它的前后处理器包括 MSC 公司的 Marc Mentat、Patran。与此同时,市场上通用的其他 CAE 前后处理器也可以生成 Marc 的数据文件 (扩展名为 dat)。

1.2.1 Mentat 与 Marc 的关系

Mentat 作为 Marc 的前后处理工具,在进行前处理时,Mentat 生成扩展名为 mud 或 mfd 的模型文件,建模完成递交分析后可自动生成 Marc 的数据文件 (.dat),Marc 在后台完成分析任务的计算后会生成可供 Mentat 进行后处理的扩展名为 t16 或 t19 的结果文件。Marc 与 Mentat 的关系如图 1-1 所示。

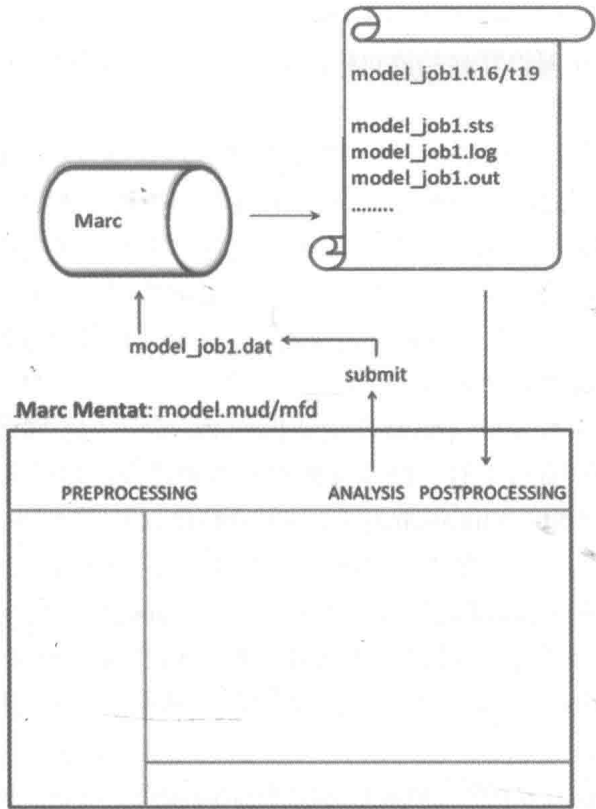


图 1-1 Marc 与 Mentat 的数据传递和交换关系

此外 Marc 还生成其他相关的文件，具体见表 1-1 的说明。

表 1-1 Marc 文件的相关说明

dat	Marc 输入数据文件，用于包含模型信息、参数信息、分析控制参数等，可由 Mentat 生成，也可直接按照 Marc 用户手册 C 卷（卡片数据说明）直接编写
out	输出文件，用于存储模型参数、迭代信息、计算结果等
sts	状态文件，显示各增量步对应的迭代次数、分离次数、回退次数以及时间步长、最大位移等
log	日志文件，记录各个增量步的迭代、收敛、时间耗费等信息
t08	重启动文件，在激活重启动功能时将必要信息根据设置写入此文件，以备后续使用
t16/t19	可在 Mentat 中进行结果后处理的文件类型
mat	材料数据库文件，用户可自行编写数据文件并保存到安装路径下以备后续使用 例如：X:\MSC.Software\Marc\20xx\marc20xx\AF_flowmat
vfs	视角系数文件，用于进行辐射分析计算

其他结果文件类型及相关说明请参考 Marc 用户手册 A 卷程序初始化部分的说明。

1.2.2 Marc 一般分析流程

使用 Marc 进行有限元分析时，首先需要定义网格模型，输入材料参数并定义边界条件，最后定义分析工况和任务参数并递交运算。Marc 针对待分析的模型数据文件（.dat），通过调

用 run_marc 命令进行分析。针对 Windows 操作平台的用户可以选择在前后处理软件 Mentat 中进行模型的创建和分析任务的提交，Marc 程序会在后台自动调用。对于 Linux 等高性能计算节点的用户，往往会选择先生成 Marc 的模型文件.dat，然后通过命令行的形式直接提交，那么需要用到 run_marc 指令及相关的参数设置。这部分可参考后续的介绍。

在非线性问题分析过程中，Marc 采用迭代方法进行求解，根据指定的收敛准则判断是否获取收敛解，并生成相关结果文件，其执行过程如图 1-2 所示。

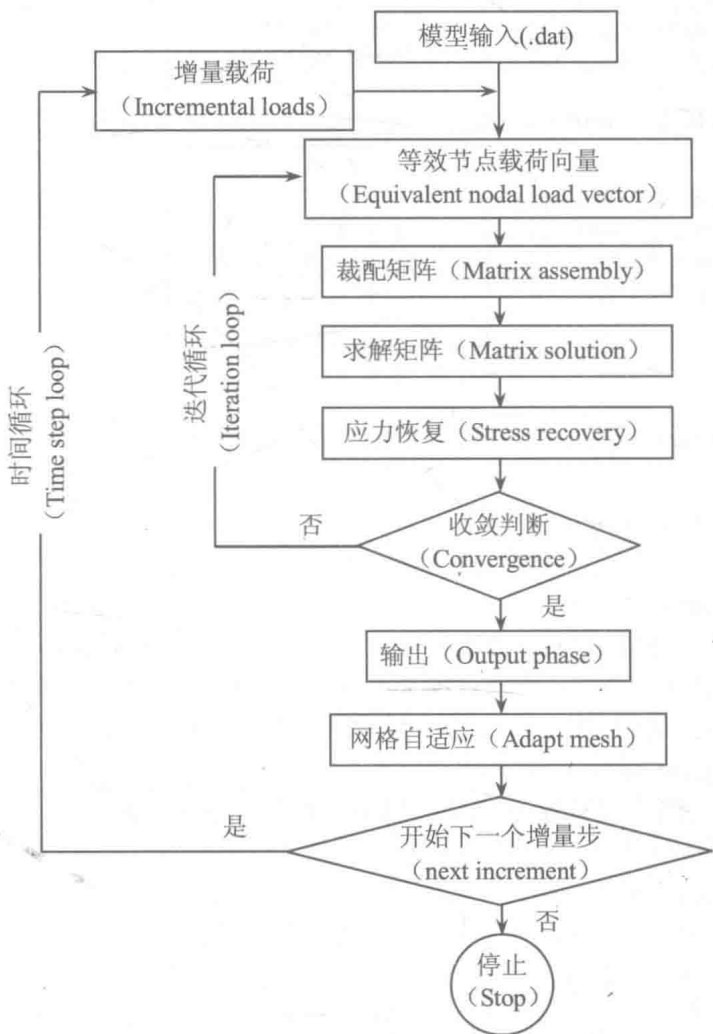


图 1-2 MSC Marc 分析流程图

由图 1-2 可知采用 Marc 进行分析的一般流程，当考虑接触时，分析流程还会增加接触探测、分离及穿透等的判断，详见第 5 章接触部分的介绍。参照流程图 1-2，分析过程中按照以下步骤创建模型并递交运算即可。

(1) 定义并生成数据文件。

数据文件可以通过 Mentat 图形交互界面进行前处理和分析参数部分定义后自动生成，也可以根据 Marc 手册 A 卷中关于数据文件结构组成的说明以及 C 卷中对各个卡片命令的格式、使用方法说明手动编写生成。数据文件的组成如图 1-3 所示。

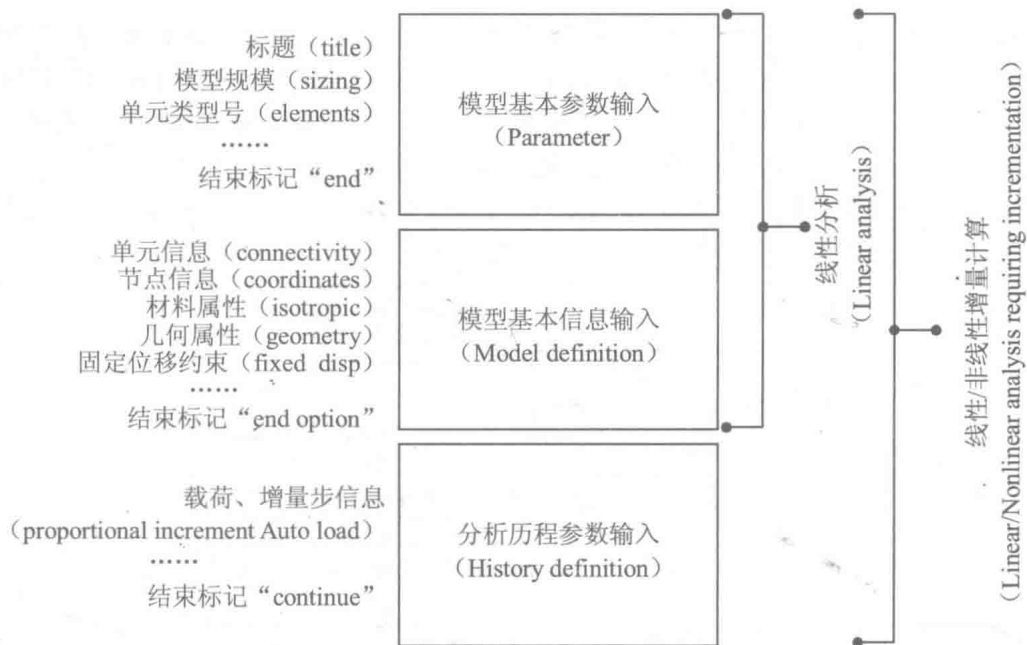


图 1-3 数据文件.dat 组成

(2) 调用 `run_marc` 命令，同时指定（并生成）必要的分析数据文件。

命令行的基本形式为：

```
run_marc -jid jobname.dat
```

或

```
run_marc -j jobname
```

其中 `-jid` 后指定待分析数据文件的名称，例如 `jobname.dat`。除此以外，`run_marc` 命令根据不同的分析需要和问题类型还支持其他命令，常用的有：

1) 重新启动分析时需要调用 `.t08` 文件，采用的命令行为 `-rid` 或 `-r`。

```
run_marc -j jobname.dat -r restart.t08
```

2) 并行分析可设定模型的分区 (DOMAIN) 数目，命令行为 `-nprods` 或 `-nps`，例如采用两个分区：

```
run_marc -j jobname.dat -nps 2
```

采用多机并行时，指定 `host` 文件，命令行为 `-host` 或 `-ho`

```
run_marc -j jobname.dat -nps 2 -h hostfile
```

3) 调用用户子程序分析，采用命令行为 `-user` 或 `-u`。

```
run_marc -j jobname.dat -u usersubroutine.f
```

4) 其他如是否在后台执行分析，采用命令行为 `-b`，例如不在后台执行：

```
run_marc -j jobname.dat -b no
```

以上操作的具体步骤请参考后续章节和例题的说明，其他命令可参考 MSC Marc 用户手册 A 卷 `program initiation` 部分的说明。

1.3 Marc 新增功能的亮点

Marc 以 Mentat 近年来发布的新版本为新老用户带来了更多的新功能和惊喜。从易用性

上, 在 Mentat 2011 版本推出全新的用户界面后, 在 Marc 2013 版本中进一步增加了新界面下的模型浏览器功能, 允许用户通过图形界面方式查看模型所包含的信息。通过模型浏览器在不同菜单间快速移动, 减少单击鼠标的次数。模型浏览器同时支持拖拽功能, 方便用户更快速地完成建模、复制、编辑等操作。在 Marc 2014.1 版本中, MSC 公司推出了 Mentat 的第一版中文界面, 方便用户更快地掌握和灵活的使用 Marc 的优异功能; 在 Marc 2011 版本中增加和增强了 CAD 接口功能后, Mentat 2013 版本的几何实体建模已经由原有的 ACIS 内核改为 Parasolid 内核, 这一变化使得 Mentat 可以更好地与众多 CAD 软件兼容。Mentat 2014 版本进一步扩展 CAD 接口功能, 允许直接导入几何实体并在 Mentat 中完成后续的几何清理、特征识别、特征编辑等操作。与此同时, Mentat 针对实体网格划分功能也进行了重大的改进, 用户可以针对复杂模型在较短的时间内完成实体网格的划分。相对 Mentat 原有实体网格划分工具的繁琐操作步骤, 新的方法一定会给用户耳目一新的感觉。在功能上, Marc 2015 不仅在高性能计算方面进一步增强了原有功能, 而且针对接触、复合材料、断裂力学、网格重划分、多物理场分析等推出了多个新的亮点功能。在 Marc 2013.1 版本推出 Marc 与 Adam 联合仿真功能后, 更在 Mentat 2014.2 版本实现了全面的界面支持, 使得用户能够更方便快捷地进行包含非线性特性的复杂机构的结构分析。下面将分别针对 Mentat 2015 和 Marc 2015 以及近年来的一些新功能亮点进行展开介绍。

1.3.1 Mentat 2015 及其近年来的新功能

1. 用户界面

Mentat 2015 全新界面与以往版本类似, 采用经典的 office 风格, 对菜单、工具栏等进行合理的布局, 如图 1-4 所示; 新的界面风格保留了 Mentat 老版本的全部功能, 默认显示将原有的动态菜单区均匀地排列在菜单条的下方, 用户可以同时打开属于不同动态菜单项的子菜单, 并顺序排列在窗口的左侧。新的菜单设计还支持窗口的拆分, 用户可以根据个人喜好和需求任意排列和放置窗口的位置。

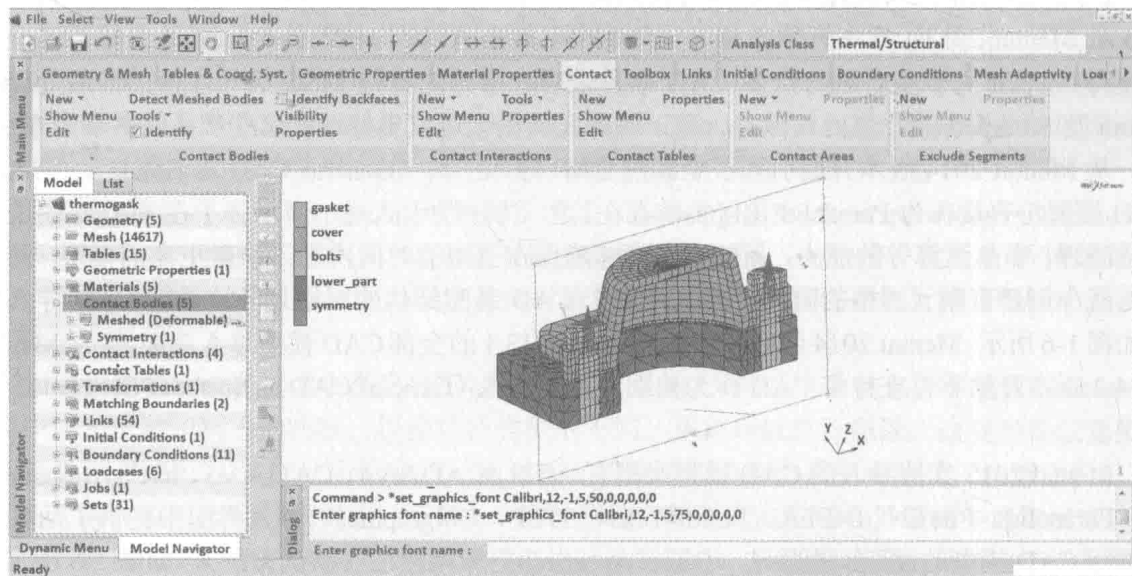


图 1-4 Mentat 2015 全新界面及模型浏览器

从 Mentat 2013.1 版本开始增加了模型浏览器功能, 让用户可以更方便地浏览模型内容。并通过模型浏览器进行建模、显示、编辑等操作。模型浏览器不仅提供模型的树状表述, 还让用户能够快速移到不同的菜单。所有的菜单, 既可从主菜单 (Main Menu) 进入也可以从模型浏览器中进入, 如图 1-4 所示模型浏览器 (Model Navigator)。模型浏览器同时支持拖拽操作, 该功能针对存在大量边界条件的模型非常有用, 关于模型浏览器的使用和介绍请参考第 2 章 2.3.5 节的相关内容。

Mentat 2014.1 版本推出中文界面, 如图 1-5 所示, 用户可以方便地根据需要启动中文或英文界面, 中、英文界面的启动方法请参考第 2 章 2.3.2 节的相关内容。

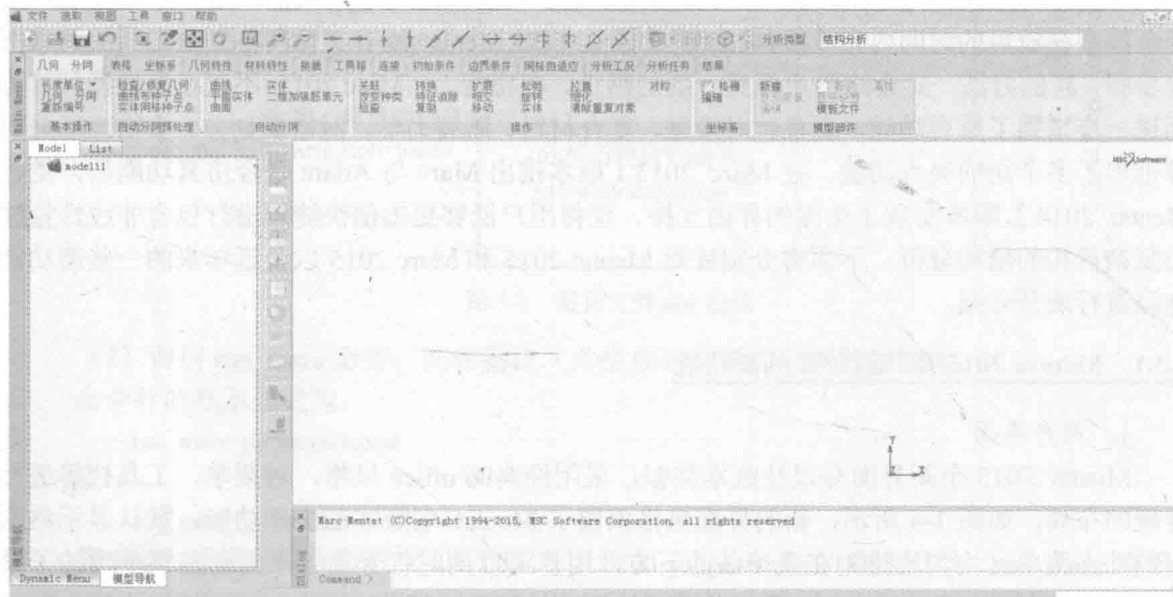


图 1-5 Mentat 2015 中文界面

2. CAD 模型导入及特征识别和特征编辑

从 Mentat 2013.1 版本开始, 几何实体建模已经由 ACIS 内核改为 Parasolid 内核, 这一变化使得 Mentat 可以更好地与众多 CAD 软件兼容。同时能够与 MSC 公司主流的前后处理器 Patran 及 Simxpert 的几何内核保持一致, 确保几何模型可以更好地在这些产品间共享和互换。

从 Mentat 2014 版本开始引入了全新的 CAD 导入工具 (General CAD as Solids), 导入的 CAD 模型可直接作为 Parasolid 几何实体存在。这一方法的引入进一步增强了在 Mentat 中进行网格清理、布尔运算等的的能力, 新的方法能够确保在更短的时间内导入质量更高的模型, 同时大大减少创建有限元网格的时间, 尤其是对于 CAD 装配结构的网格划分。最新 CAD 导入菜单如图 1-6 所示。Mentat 2014 同时保留了 Mentat 2013.1 的全部 CAD 模型导入功能, 但从 Mentat 2014.2 版本开始不再支持将 CAD 作为曲面或单元导入 (General CAD as Surfaces/Elements) 的功能。

Mentat 2015 支持导入的 CAD 模型类型有 ACIS、CATIA V4、CATIA V5、IGES、Inventor、JT、Parasolid、Pro/ENGINEER、SolidWorks、STEP、Unigraphics。导入界面中提供了两种方法进行 CAD 模型的读取: 直接法 (Direct Approach) 和间接法 (默认方法), 如图 1-6 所示。在直接法中, CAD 模型被直接导入到 Mentat 中, 并以 Parasolid 几何存在。在这一过程中没有