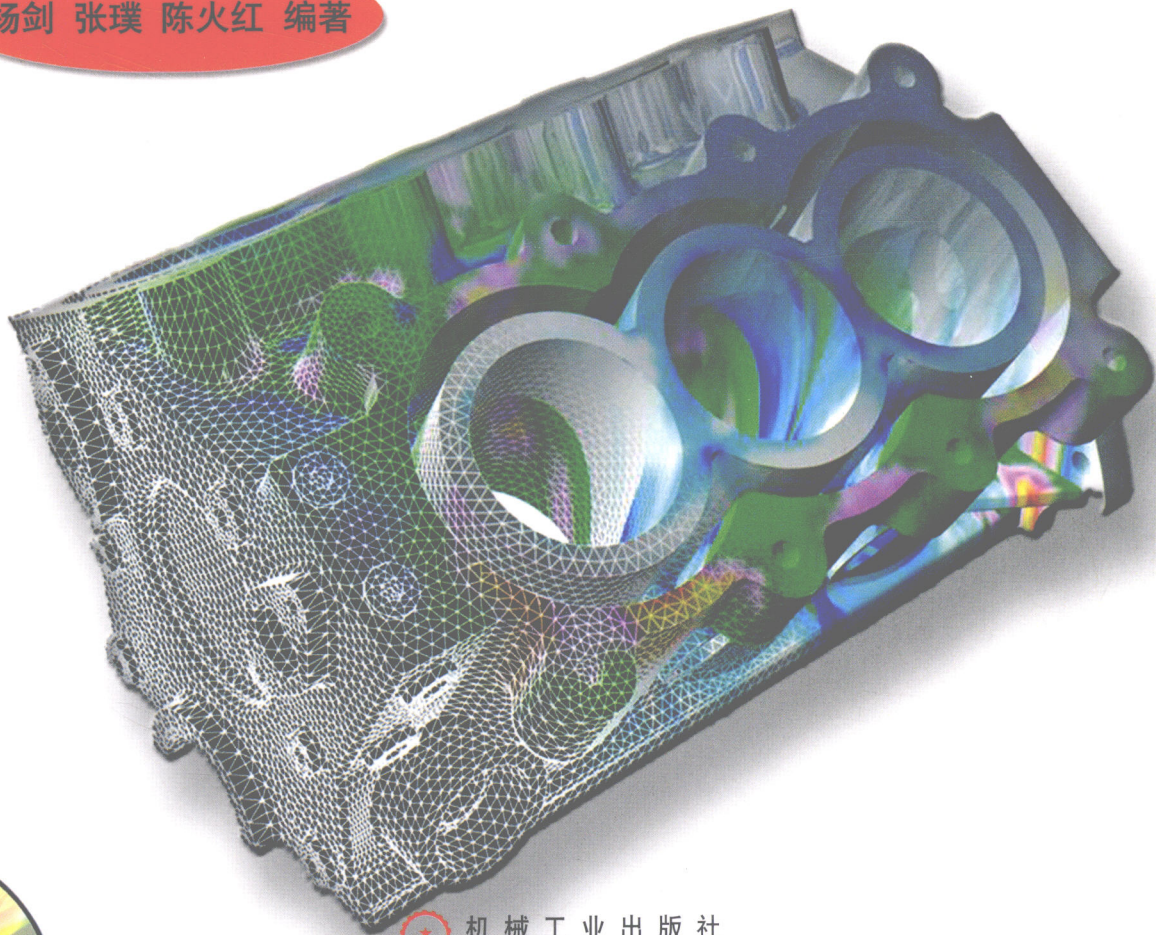


# 新编

# MD Nastran有限元实例教程

杨剑 张璞 陈火红 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

# 新编

# MD Nastran有限元实例教程

杨剑 张璞 陈火红 编著



机械工业出版社  
China Machine Press

本书介绍 MD Nastran 软件在不同领域的基本理论和使用方法。包括 MD Nastran 简介, MD Nastran 线性静力分析和线性动力分析的有限单元法基本理论和求解基本过程, 新加的非线性求解序列 SOL 400 的基本理论、求解技术以及使用方法, 隐式非线性求解序列 SOL 600 的基本理论以及使用方法, 显式非线性求解序列 SOL 700 的分析功能、文件系统以及使用方法, 有关复合材料结构分析基本理论和分析方法, 各类优化分析功能以及使用方法的流固耦合分析的基本理论和分析方法, 连接技术和使用方法, 开发工具 DMAP 的基本知识和使用方法, 及采用 MD Nastran 进行多种不同类型的分析。本书中的大部分内容同样适用于使用 MSC Nastran 和 Patran 的用户。由于本书内容较广, 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, 对书中的例子配有解说动画, 可以边操作边看动画。

本书可作为理工科院校相关专业的高年级本科生、研究生、教师、广大科研工程技术人员学习 MD Nastran 和 MSC Nastran 软件的教材或参考书。

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 MD Nastran 有限元实例教程/杨剑, 张璞, 陈火红编著. - 北京: 机械工业出版社, 2008.1

ISBN 978-7-111-22424-2

I. 新… II. ①杨…②张…③陈…III. 有限元分析-应用软件, Nastran-教材 IV. 0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 150406 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

北京京北制版厂印刷·新华书店北京发行所发行

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·27.25 印张

定价: 52.00 元 (附 DVD 光盘)

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换  
本社购书电话: (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，有限元方法已成为计算力学和计算工程科学领域中最有效的计算方法。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以 MSC Nastran 为代表的通用有限元软件，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和社会效益。

MSC Nastran 软件于 20 世纪 80 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。

近几年来，MSC Software 公司根据用户的需求，一直致力于软件技术的发展，不仅不断地推出 MSC Nastran 新版本，增加了许多新的功能，而且对原有一些功能也进行了很多改进，还从 2006 年开始推出面向下一代设计开发的最完整仿真引擎 MD Nastran。MD Nastran 在继承原有 MSC Nastran 强大功能的基础上，开发和集成了隐式非线性、显式非线性、转子动力学、外噪声分析等最先进的功能。

2003 年以来国内出版了多本有关 Patran 和 MSC Nastran 的书籍，为国内读者学习使用 MSC Nastran 和 Patran 提供了很多帮助。为使用户特别是新用户更好地掌握和使用 MD Nastran 和 MSC Nastran，出版一本新的、系统介绍使用方法的、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 MD Nastran 和 MSC Nastran 软件的参考书，也可作为理工院校相关专业的高年级本科生、研究生及教师学习 MD Nastran 和 MSC Nastran 软件的教材或参考书。

本书既有有限元基本理论的介绍，更有大量的实例介绍，编者为了使读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 MD Nastran 和 MSC Nastran 分析各类问题。

由于本书内容广泛，不同的读者均可以从中得到收获。对于初学者，可以达到入门的目的；对一些老用户，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 MSC Nastran 和 MD Nastran 软件的经验以及对用户进行培训和技术支持的经验，本书是非常实用的一本书，因而也适合公司对用户进行 MSC Nastran 和 MD Nastran 软件培训。

MSC Software 中国区技术总监

金毅民

# 前 言

MSC.Nastran 软件于 20 世纪 80 年代开始在我国各个工程领域和科研领域得到广泛的应用, 为各领域中的产品设计和科学研究做出了很大的贡献。

近几年国内出版了一些 MSC Nastran 的教材, 对广大用户学习和使用该软件起到了较大的帮助作用。但 MSC Nastran 不仅不断有功能更强大的新版本推出, 而且在 2006 年更是推出了面向下一代设计开发的最完整的仿真引擎 MD Nastran。为使用户特别是新用户更好地掌握和使用 MD Nastran 与 MSC Nastran, 出版一本全新的、系统地介绍使用方法的、简明实用的书是十分必要的。

本书介绍了 MD Nastran 软件在不同领域的基本理论和使用方法。全书共分 12 章: 第 1 章讲述 MD Nastran 程序的概况, 简要介绍 MD Nastran 程序的发展过程、主要模块和基本功能, 使读者对该软件有一个初步的认识; 第 2 章介绍 MD Nastran 线性分析的有限单元法基本理论和求解的基本过程, 简要介绍 MD Nastran 线性求解的基本步骤和操作方法; 第 3 章介绍 MD Nastran 线性动力学分析的基本理论、基本过程以及分析类型; 第 4 章介绍 MD Nastran 新增加的非线性求解序列 SOL 400 的基本理论、求解技术以及使用方法; 第 5 章介绍 MD Nastran 隐式非线性求解序列 SOL 600 的基本理论以及使用方法; 第 6 章介绍 MD Nastran 显式非线性求解序列 SOL 700 的分析功能、文件系统以及使用方法; 第 7 章介绍 MD Nastran 有关复合材料结构分析的基本理论和分析方法; 第 8 章介绍 MD Nastran 的各类优化分析功能以及使用方法; 第 9 章介绍 MD Nastran 的流固耦合分析的基本理论和分析方法; 第 10 章介绍 MD Nastran 连接技术和使用方法; 第 11 章介绍 MD Nastran 开发工具 DMAP 的基本知识和使用方法; 第 12 章通过两个实例介绍如何采用 MD Nastran 进行多种不同类型的分析。

本书中第 2、3、5、7、8、9、10、11 章的内容, 同样适用于使用 MSC Nastran 和 Patran 的用户, 操作过程几乎相同, 在书中不再注明。

由于 MD Nastran 功能极其强大, 本书介绍的功能只是其中的一部分, 其他功能用户可以参考软件安装时所附的文档。

本书涉及的内容较广, 读者可根据自己的需要进行选择性阅读。要充分掌握该软件, 还需要进行大量的上机操作。本书配有光盘, 对书中的例子配有解说动画, 读者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、广大科研工程技术人员学习 MD Nastran 和 MSC Nastran 软件的教材与参考书。

在本书编写过程中得到了 MSC.Software 中国各办事处的很多同志的大力支持, 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 10 月

# 目 录

序言	
前言	
第 1 章 MD Nastran 简介	1
1.1 MSC.Software 公司与 Nastran	1
1.1.1 MSC.Software 公司概况	1
1.1.2 Nastran 历史	2
1.2 MD Nastran 的分析功能	4
1.3 MD Nastran 程序的组织框架	7
1.4 MD Nastran 的输入文件	7
1.4.1 文件管理段	8
1.4.2 问题定义段	8
1.5 MSC Patran 与 MD Patran	8
第 2 章 线性静力分析	10
2.1 概述	10
2.1.1 线性静力分析的基本假设	10
2.1.2 弹性力学问题的基本方程	10
2.1.3 线弹性力学的有限元方法	12
2.1.4 MD Nastran 线性静力分析过程	13
2.2 梁杆结构分析	13
2.2.1 一维线弹性杆单元 ROD	13
2.2.2 等截面弯曲梁单元 BAR	14
2.2.3 变截面弯曲梁单元 BEAM	19
2.2.4 曲线梁单元 BEND	21
2.3 板壳结构分析	23
2.3.1 剪力板单元 SHEAR PANEL	23
2.3.2 壳体单元 SHELL	24
2.3.3 曲壳单元	27
2.4 实体结构分析	28
2.4.1 三维实体单元的定义	28
2.4.2 三维实体单元的属性	29
2.4.3 单元坐标系	30
2.4.4 应力和应变计算	31
2.5 线性静力分析实例	31
第 3 章 线性动力分析	43
3.1 概述	43
3.1.1 基本概念	43
3.1.2 MD Nastran 动力分析类型	44
3.1.3 MD Nastran 动力分析过程	44
3.2 运动方程	45
3.2.1 运动方程简介	45
3.2.2 运动方程求解	46
3.2.3 质量	48
3.2.4 阻尼	49
3.3 特征值分析	51
3.3.1 实特征值分析	51
3.3.2 实特征值计算方法	52
3.3.3 实特征值分析控制卡片	53
3.3.4 实特征值分析实例	54
3.3.5 复特征值分析	60
3.4 频率响应分析	61
3.4.1 直接频率响应分析	61
3.4.2 模态频率响应分析	62
3.4.3 直接法与模态法的比较	64
3.4.4 频率响应分析实例	64
3.5 瞬态响应分析	73
3.5.1 直接瞬态响应分析	73
3.5.2 模态瞬态响应分析	75
3.5.3 直接法与模态法比较	77
3.5.4 求解的积分时间步	78
3.5.5 瞬态响应分析实例	78
3.6 响应谱分析	86
3.6.1 响应谱分析概述	86
3.6.2 响应谱分析实例	87
3.7 随机振动分析	96
3.7.1 随机振动分析概述	96
3.7.2 随机振动分析实例	96
第 4 章 高级非线性分析	102
4.1 概述	102
4.1.1 非线性问题	102

4.1.2	非线性问题的一般求解方法	103	6.1.3	显式时间积分方法	190
4.1.3	非线性分析的控制卡片	104	6.2	侵入分析	192
4.1.4	SOL 400 模块的分析功能	105	6.2.1	材料本构关系	192
4.2	材料非线性分析	106	6.2.2	实例分析	193
4.2.1	弹性材料行为	106	6.3	鸟撞分析	203
4.2.2	弹塑性材料行为	107	6.3.1	材料本构关系	204
4.2.3	材料非线性分析实例	111	6.3.2	实例分析	204
4.3	屈曲分析	119	第 7 章	复合材料的建模与分析	216
4.3.1	屈曲分析分类	119	7.1	概述	216
4.3.2	屈曲分析实例	121	7.1.1	MSC 产品的支持	216
4.4	非线性静动力分析实例	135	7.1.2	有关复合材料的概念	216
4.4.1	问题描述	135	7.2	使用 MD Patran 创建复合材料	217
4.4.2	分析过程	136	7.2.1	MD Patran 复合材料建模	218
第 5 章	隐式非线性分析	146	7.2.2	失效准则分析	222
5.1	概述	146	7.3	使用 Laminate Modeler 创建 复合材料	227
5.1.1	SOL 600 模块的分析功能	146	7.4	复合材料整流罩的建模	231
5.1.2	SOL 600 模块的求解流程	147	7.5	双曲率曲面铺层及剪口使用	238
5.2	接触	147	第 8 章	MD Nastran 结构优化分析	244
5.2.1	接触问题的描述方法	147	8.1	概述	244
5.2.2	接触算法的基本流程	148	8.1.1	MD Nastran 的优化功能	244
5.2.3	接触体的定义	148	8.1.2	基本优化问题描述	245
5.2.4	刚体运动描述	151	8.2	尺寸优化	246
5.2.5	接触探测	152	8.2.1	问题描述	246
5.2.6	模拟摩擦	154	8.2.2	建立有限元模型	247
5.2.7	模拟分离	156	8.2.3	建立优化过程	255
5.3	接触分析实例	156	8.2.4	提交优化计算任务	259
5.3.1	二维接触分析实例	156	8.2.5	优化结果的显示	261
5.3.2	三维接触分析实例	168	8.3	MD Nastran 优化求解文件分析	263
5.4	橡胶材料特性的分析	176	8.3.1	定义优化参数	263
5.4.1	概述	176	8.3.2	分析类型	264
5.4.2	弹性体的宏观行为	177	8.3.3	设计变量	265
5.4.3	Mooney 材料	178	8.3.4	设计响应	268
5.4.4	Rivlin 表达式	179	8.3.5	目标函数	270
5.4.5	Ogden 模型	180	8.3.6	定义约束	270
5.4.6	MD Nastran 模拟橡胶材料	181	8.3.7	定义输出控制	273
5.4.7	橡胶材料分析实例	181	8.4	MD Nastran 形状优化	274
第 6 章	显式非线性分析	189	8.4.1	基础向量的概念	274
6.1	概述	189	8.4.2	手动结点输入法	276
6.1.1	SOL 700 模块的分析功能	189	8.4.3	基于形状直接输入法的 形状优化	277
6.1.2	SOL 700 模块的文件系统	190			

8.4.4 基于解析边界法的形状优化	290
8.5 MD Nastran 的拓扑优化	307
8.5.1 简介	307
8.5.2 平板结构的拓扑优化	308
<b>第 9 章 流固耦合</b>	<b>315</b>
9.1 概述	315
9.2 虚拟质量法	315
9.2.1 虚拟质量法描述	315
9.2.2 MD Nastran 虚拟质量法实现	316
9.2.3 实例分析	318
9.3 附加质量法	331
9.3.1 附加质量法描述	331
9.3.2 实例分析	332
<b>第 10 章 刚性单元及连接分析</b>	<b>336</b>
10.1 多点约束 MPC	336
10.1.1 MPC 的用途	336
10.1.2 MPC 的定义	337
10.2 刚性单元和约束单元	337
10.2.1 两结点间的刚性连接 RBAR	338
10.2.2 一般刚性约束单元 RBE2	339
10.2.3 加权平均约束单元 RBE3	339
10.2.4 壳与实体的过渡单元 RSSCON	340
10.3 连接单元	341
10.3.1 CWELD 单元的定义	342
10.3.2 CWELD 单元的属性	344
10.3.3 CWELD 单元的输出	344
10.3.4 CFAST 单元简介	345
10.3.5 CSEAM 单元简介	345
10.3.6 连接单元分析实例	346
<b>第 11 章 DMAP 语言介绍</b>	<b>360</b>
11.1 概述	360
11.1.1 DMAP 语言的特点	360
11.1.2 DMAP 的应用及 MD Nastran 的输入输出文件	361
11.1.3 DMAP 的格式	362
11.1.4 DMAP 中的参数、表、以及 矩阵概念	363
11.1.5 创建 DMAP 函数	364
11.2 DMAP 的参数	365
11.2.1 一个参数应用的例子	365
11.2.2 DMAP 参数的定义	367
11.3 DMAP 的模块	372
11.3.1 DMAP 中信息的输入和 矩阵的读写	372
11.3.2 矩阵的操作	379
11.4 DMAP 子程序的形式	386
11.4.1 subDMAP 的格式	386
11.4.2 MD Nastran 中矩阵的 命名规则	387
11.4.3 查看 SOL 列表	387
11.4.4 结构求解序列	391
11.5 修改已有的 DMAP 求解序列	392
11.5.1 确定更改位置	393
11.5.2 ALTER 语句	393
11.5.3 一个修改 SOL 101 的 DMAP 算例	394
<b>第 12 章 复杂工况分析</b>	<b>401</b>
12.1 概述	401
12.2 汽车盖板分析	401
12.3 飞机起落架分析	416
<b>参考文献</b>	<b>426</b>



# 第 1 章

---

## MD Nastran 简介

### 1.1 MSC.Software 公司与 Nastran

#### 1.1.1 MSC.Software 公司概况

MSC.Software Corporation (简称 MSC.Software) 创建于 1963 年, 总部设在美国洛杉矶, 是国际著名的工程校验、有限元分析和计算机数值模拟应用软件 (CAE) 供应商之一, 也是大型通用结构有限元软件 MSC.Nastran (MD Nastran) 的开发者。

自 1983 年 MSC.Software 公司股票上市以来, 该公司通过并购重组迅速发展:

- 1989 年收购闻名于国防、核能和汽车行业的流体 CAE 软件公司 Pisces International。
- 1993 年收购著名 CAD 供应厂商 Aries Technology 公司。
- 1994 年收购当时全球第二大 CAE 公司 PDA Engineers。
- 1998 年收购机构动力学和运动学仿真软件公司 Knowledge Revolution。
- 1999 年收购顶尖高度非线性 CAE 软件公司 Marc。
- 2001 年与 IBM/Dassault 结成全球战略联盟, 共同向市场提供内容广泛的“产品生命周期管理” (Product Lifecycle Management, PLM) 集成分析和仿真分析软件包。
- 2001 年收购 IBM/Dassault 在美国最大的合作伙伴 AES 公司。
- 2002 年收购全球顶尖的机构动力学仿真软件公司 MDI。

在并购之后重新组合的 MSC.Software 产品系列从低端桌面级设计工具, 向上延伸到中端专业级仿真软件, 到最顶层的高端企业级分析平台。MSC.Software 以其丰富的产品系列、优秀的行业应用专长和一流的技术服务, 为制造业及相关行业提供全套解决方案, 赢得超过 40% 的全球 CAE 市场份额, 一直高居 CAE 业榜首。

MSC.Software 公司的产品广泛应用于各个行业的工程仿真分析, 包括国防、航空航天、机械制造、汽车、船舶、兵器、土木、水利、电子、铁道、石化、能源、材料工程等, 用户遍及 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 98% 的国防及军事研发部门。

MSC.Software 公司在创建以来的 40 多年里, 始终把握着世界 CAE 领域的发展方向, 不断推出面向客户最新需求的仿真工具。其产品作为公认的 CAE 工业标准, 获得各种权威机构的质量认证。例如, MSC.Nastran 软件获得美国联邦航空管理局 (FAA) 认证, 成为领取飞行器适航证指定的惟一验证软件。

21 世纪全球经济飞速发展,市场竞争随之不断加剧,先进设计技术和产品开发工具是制造业以最小投入获取最大利润的强有力的技术保障。贯穿于产品概念设计、详细设计和制造过程的 CAE 仿真工具对提高产品性能质量有着举足轻重的作用。MSC.Software 公司为制造业提供集软件工具、行业专长和专业化服务的一揽子解决方案,帮助制造业在产品的设计定型或生产之前预测、仿真和优化产品的性能质量,改进产品加工工艺,降低设计成本,节约资金,缩短产品投入市场的时间,大幅提升竞争实力。

另外,为了满足企业级仿真的需求, MSC.Software 推出了企业解决方案 SimEnterprise。

MSC.Software 最近发布的企业级解决方案 SimEnterprise R2 版本,包括 SimXpert、SimDesigner 和 imManager,提供在多学科之间专家知识获取和再用等高级功能,通过此高效的企业级仿真方案加速产品研发。

MSC.SimManager 是企业级仿真管理平台。它是一个基于网络的系统,可以方便地被所有流程的参与者访问并使得各部门和公司之间可以协作。这使得在开发过程中,可以以一种一致的、透明的方式查看仿真结果并进行研究,增加了仿真的效率,使设计者可以做出基于功能的设计决策。SimManager 具备将分析专家、设计师、供应链和企业之间的仿真流程和数据进行管理的能力, SimManager 管理仿真信息、流程追踪、数据查询如模型、结果、报告和其他重要的信息。

SimDesigner 提供一个直观的、集成于 CAD 环境的分析工具,使设计工程师及其设计团队能够在设计早期即进行可重复的、有完善的文档描述的仿真分析。全企业中的产品设计人员都能在统一环境中对产品进行协同的性能仿真。SimDesigner 扩展了设计师在 CAD 环境中的仿真和性能评估能力,除了将最基本的分析功能集成到 CAD, SimDesigner R2 还可以通过调用在 CATIA V5 中的模板再利用专家知识,现在此功能扩展到了 Pro/ENGINEER Wildfire,这种执行专家模板的功能使得设计师可以最快地在设计初始阶段进行结构、运动和热分析,降低产品后期的设计费用。

作为针对企业分析工程师量身定制的下一代多学科仿真平台, MSC SimXpert 一经发布便因与众不同的独特功能而备受瞩目。通过 SimXpert,工程师可以在完整而统一的架构和界面环境下基于一个共同的数据模型实现多学科联合仿真;它支持对多种 CAD 软件和模型的直接访问和双向互动;具有先进的仿真流程定制功能,进行知识的捕获、积累和重用,并实现仿真流程自动化;与 MSC 企业仿真管理平台 SimManager 完全集成,通过 SimManager 进行仿真流程和数据的管理,加强人员之间的协作;与 MSC 针对设计人员定制的嵌入 CAD 平台的早期分析工具 SimDesigner 无缝集成,完全兼容和支持 SimDesigner 的分析模型,使分析-设计之间的交流更加方便。

SimXpert 使仿真专家十分便利地创建最佳仿真过程的可重复使用的模板,为其他分析师、工程师和设计师所共享,以提高生产力和结果可靠度。SimXpert 的模板是对单一的模型利用多学科求解器 MD Nastran、MD Adams 和 LS-Dyna 进行求解,消除了由于手工在模型间传递数据带来的误差,同时提升了不同工作组间的协同性。

### 1.1.2 Nastran 历史

Nastran 是美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, 简称 NASA, 又称美国宇航局)为适应各种工程分析问题而开发的多用途有限元分析程序。这个系统称为 NASA Structural Analysis System, 命名为 Nastran。

20 世纪 60 年代初,美国宇航局为登月需要,决定使用有限元法开发大型结构分析系统,并

能在当时所有大型计算机上运行。为此，以虚构名 Tom Butler 命名的 NASA 小组制定了一套全新的通用分析系统规范。它采用了当时惟一的但并不成熟的高级语言 Fortran，在计算机计算速度还很慢、内存还很小且没有硬盘存储器的情况下，创造性地完成了该系统的研制。开发小组包括 Computer Science Corporation 和 MacNeal-Schwendler Corporation（即 MSC 公司）。Nastran 程序最早在 1969 年通过 COSMIC（Computer Software Management and Information Center）对外发行，一般称为 COSMIC.Nastran。之后又有各种版本的 Nastran 程序发行，其中以 MSC 公司所开发的 MSC.Nastran 程序用户最为广泛。如今 MSC.Nastran 已成为标准版的 Nastran，是全球应用最广泛的分析程序之一。

当今，随着计算机和计算技术、有限元理论、计算机图形学、微分几何和制造业数字化技术的迅速发展，在工业和科学技术领域已经形成了计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助制造(CAM)以及产品管理系统等一系列商业化软件产品。每类产品和每类产品之间的数据都具有互相传输的功能，都要求智能化、可视化、一体化、交互式等。为此，从 2001 年以来，MSC.Software 额外投入了 500 多人—的研发力量把工程性的 MD Nastran 开发成具有无与伦比的广度和深度的仿真产品。

MSC.Software 不断完善和扩充 MSC.Nastran，2006 年成功发布了新一代的多学科仿真工具 MD Nastran，在继承原有 MSC Nastran 强大功能的基础上，集成了高级非线性、显式非线性、外噪声分析等功能。

为了把最全面的仿真分析技术应用到所有的领域，MD Nastran 通过一个完全集成的系统提供了真正的多学科仿真。这是目前业界最强大和得到最广泛应用的仿真方案，其中的基础产品也是四十多年来用户首选的仿真产品。

通过提供极限的并行设计仿真能力，MD Nastran 使企业能够：

- **产品更快速投放市场**——快速透彻了解整个设计性能，能够使设计环节速度更快和使整个方案时间缩短 50% 以上。
- **更低的制造成本**——在设计过程中更早地了解设计产品的性能，从而能够在设计获批准之前发现和修改缺陷。同时，能够更早地确定可加工性、优化制造环节时间、减少材料余量和防止不必要设备的投资。
- **提高分析效率**——对共同分析数据模型的支持，避免了在不同学科仿真之间手工传递信息和数据。
- **改善产品质量和降低维护成本**——通过对多学科之间复杂交互作用的准确描述，MD Nastran 仿真结果更准确地反映了真实结果，消除了使用过程中意想不到的操作错误。

MD Nastran 具备多学科优化的能力，并具有处理大规模问题和提升高性能计算效能的强大能力。针对制造商对越来越复杂模型进行交互多学科分析的需要，MD Nastran 提供的关键功能可以提高设计效率和完善流程管理。

MD Nastran 的优化功能具有尺寸、形状、拓扑等的组合优化能力，可以提高整个设计效率，并可预测产品全生命周期内的性能。MD Nastran 独特的优化序列能够综合考虑各种工况，如静态 NVH 加内外噪声，从而可更准确地确定设计的鲁棒稳健性。

只有 MD Nastran 在仿真时支持多学科之间的交互作用和耦合效应。无论线性、非线性、运动学，还是显式动力学，MD Nastran 都能够让多种学科一起工作，从而准确地、适时地在多学科之间提供正确的工程和力学反馈。

MD Nastran 进行了算法优化以充分利用并行和 64 位计算结构的革新带来的好处，以便于快速地得到极其复杂工程问题的准确结果。优化了在 64 位超级计算环境中的运行性能后，MD Nastran 既可以做简单的线性静力分析，也能够做数百万自由度的极其复杂的瞬态非线性分析。如图 1.1 所示的发动机模型，共有 2400 万个自由度，在小型机上运算，采用新加的迭代求解器，不到 50 分钟求解一个线性静力载荷工况。

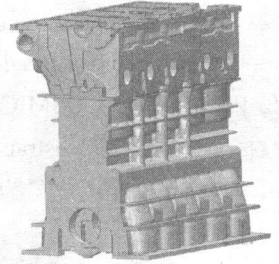


图 1.1 发动机模型

MD Nastran 把最好的解算器 Nastran、Marc、Dytran、Adams 和 LS-Dyna 综合成一个完全集成的多学科仿真方案提供给生产企业。这些高度协调、世界一流的解算器提高了数倍的分析速度、支持极大模型、能够建立极其复杂的模型。这包括显式非线性分析、隐式非线性分析、高级动力学、接触、非线性材料、多体运动仿真、有限元和多体系统集成。

MD Nastran 使用单个的公共分析数据模型，消除了单学科仿真工具之间重复建模的必要。这使得生产商消除了既耗费时间又容易出错的多个模型间数据传递和模型准备的任务，从而将整个方案时间减少了 50% 以上。此外，单个分析数据模型可以用于各个学科分析小组，从而提高了企业内部工作的协同性，并能在整个流程中更早地发现设计缺陷。

尽管单学科仿真方案通过依次使用可以来分析多个学科的问题，但它们却不能准确地反映在真实环境条件下这些学科之间的交互作用。MD Nastran 利用多学科之间的复杂交互作用保证精确地模拟仿真物理现象，使得工程师能够正确地仿真设计产品在真实环境条件下的运行性能，真正摆脱对高成本物理样机的依赖。

对于工程师密集的高技术含量的产品，如汽车、航空、重型设备、医疗设备、电子和其他复杂产品，MD Nastran 通过集成的多学科，支持对这些特定工业产品的仿真。例如，汽车设计中的噪声、振动、啸叫 (NVH) 和声场；飞行器机身、机翼和副翼、着陆装置的强度和结构动力学；消费电子设备中对流、传导、辐射下的温度波动效应。

## 1.2 MD Nastran 的分析功能

MD Nastran 支持多个关键工程学科和相应的高性能分析，包括线性和非线性静力、振动特性、线性和非线性动力学、稳态和瞬态热力学、线性和非线性屈曲、设计优化和灵敏度、拓扑优化、转子动力学、气动弹性、声学、并行能力 (SMP 和 DMP)、动力设计分析方法 (DDAM)、包含接触的隐式非线性、显式非线性的跌落和碰撞、直接矩阵提取编程 (DMAP)、高级连接和装配。

MD Nastran 的分析功能可以按照求解序列分类，如表 1-1 所示。

表 1-1 分析功能

求解序列编号	求解序列说明	求解序列编号	求解序列说明
101	静力分析	109	循环对称频率响应
103	正则模态分析	110	非线性瞬态分析
105	屈曲分析	111	静气动弹性响应
106	非线性静力分析	112	空气动力颤振
107	直接复特征值分析	114	气动弹性响应
108	直接频率响应分析	115	稳态热传导

(续)

求解序列编号	求解序列说明	求解序列编号	求解序列说明
118	直接瞬态响应分析	159	瞬态热传导
129	模态复特征值分析	190	数据库迁移
144	模态频率响应分析	200	优化
145	模态瞬态响应分析	400	高级非线性
146	循环对称静力分析	600	隐式非线性
153	循环对称模态分析	700	显式非线性

MD Nastran 与其他有限元程序比较, 具有相当多的优点:

- 能分析大部分的工程问题, 有广泛的用户群。
- 程序效率高, 对存储空间的安排清楚而有效。
- 输入格式清楚而易于了解, 程序具有输入数据的查错能力。
- 易于控制输出数据的格式。
- 程序可塑性高, 用户可用 DMAP (Direct Matrix Abstraction Programming) 来增加或改变程序的功能及执行过程。
- 程序可靠度高, 可使用 MSC.Patran (MD Patran) 进行前后处理。
- 能更积极地回应用户的需要。

目前最新的版本为 R2 版, R2 版在原有基础上推出了很多新功能, 主要体现在以下分析领域: 接触分析、非线性分析、NVH 和声学、汽车动力系统、碰撞与乘员安全、高性能计算、装配体建模、优化、转子动力学、气动弹性力学。

#### 1. 线性和非线性分析中的接触问题

- SOL 101 中线性接触。

一个模型中唯一的非线性因素是接触, 其余的全是线性的。

- SOL 101、103、105、107、108、109、110、111、112 中永久黏合接触。

黏合接触模拟没有相对运动的接触面, 计算方法是施加约束, 而不是非线性接触算法。

- SOL 400 中非线性接触。

这是一个通用的接触算法, 模型中的非线性因素不仅可以有接触, 还可以有材料非线性和几何非线性。包含接触的 SOL 101 模型可以不用重新建模直接转用 SOL 400 计算。

#### 2. 完整的高级非线性分析 SOL 400

- **非线性接触。**

模拟多体接触, 包括接触体相对运动、非线性材料、大位移、大应变, 可以用于非线性静力学问题和非线性瞬态动力学问题。

- **非线性单元和材料。**

特别是非线性垫圈材料, 线弹性材料失效模型, 轴对称、壳体、实体复合材料单元, QUADR/TRIAR 单元可以用于非线性分析。

- **非线性序列。**

在一次计算中可以进行多步计算, 也可以进行多个独立工况计算, 或者多个不同类型计算的混合。

- **裂纹和层裂。**

采用一种新的方法 (VCCT) 计算裂纹能量释放率, 新的界面单元库可以模拟层裂过程。

- **运动单元。**

新的刚性单元可以计算有大转动的几何非线性问题，包括非线性静力和瞬态问题。

### 3. 隐式非线性分析 SOL 600

- **热传导。**

SOL 600 中可以进行高级热分析，热分析后可以自动进行热应力分析。复合材料热分析能够精确模拟厚度方向的热分布梯度。

- **建模改进。**

连接单元 CFAST、CWELD、CBUSH，断裂力学应力强度因子计算，层裂的预测。

- **性能改进。**

计算速度提高，内存需求降低等。

### 4. 显式非线性分析 SOL 700

- **气囊和乘员安全。**

- **时域 NVH。**

- **预应力。**

- **Nastran 格式的输出。**

计算结果用 MD Patran 进行后处理。

- **新材料、新单元。**

增加 30 种新材料模型和 5 种新单元。

- **接触。**

增加了许多新的接触分析功能，如黏合接触、点面接触、边对边的接触、面面接触、点焊接触等。

### 5. NVH 和声学

- **频率响应函数 (FRF) 及其综合 (FBA)。**

一个快速的频率响应分析方法。

- **外声场分析。**

### 6. 数值计算的改进

- **稀疏矩阵求解器。**

增加了两个新求解器 TAUUS (静力学) 和 UMFPACK (非对称的)。UMFPACK 用于计算外声场。提高了 Lanczos 算法对内存的利用效率。

- **迭代求解器。**

放松了对 CASI 求解器的限制。

- **自动部件模态综合法 (ACMS)。**

ACMS 可以用于外部超单元，降低了计算时间、I/O 和硬盘空间的要求。

- **其他高性能计算。**

支持微软 Cluster，支持 Intel 和 AMD 的 64 位芯片，给用户提供了更多的计算诊断信息。

### 7. 单元和连接

- **连接单元。**

增加两个新连接单元 CSEAM 和 RBE2GS。

- **复合材料梁单元。**

## 8. 优化

## ● 拓扑优化。

可以同时联合进行拓扑、尺寸、形状优化。

## ● 自动外部超单元优化 (AESO)。

自动把模型划分为优化区域和非优化区域，非优化区域作为外部超单元，提高计算速度，不要求用户了解超单元。

## ● 随机优化。

预释放版本。

## 9. 转子动力学

## ● 在频率响应中可以直接考虑不平衡载荷。

## ● 阻尼的定义更加简便。

## ● 作为预释放版本，转子刚度、质量、阻尼可以在 SOL 200 中进行优化。

## 10. 气动弹性力学

## ● 引入新型监控点，监控气动载荷，如升力和俯仰力矩。

## ● 结构的气动模型与有限元模型之间的插值技术的改进。

### 1.3 MD Nastran 程序的组织框架

MD Nastran 是数据库式的矩阵结构的系统，用于解决物理分析的多场问题，其基本架构如图 1.2 所示，它是由数据库、执行控制系统和目标模块组成。目标模块包括模型模块、功能模块和输入/输出模块等。模型模块包括几何模型、单元模型、载荷、边界条件、材料特性等。在执行控制系统控制下，功能模块由模型数据经过运算生成刚度、载荷、质量等矩阵，存入数据库。数据库的数据，也可以由输入/输出模块产生，在执行控制系统控制下存入数据库。又是在执行控制系统控制下，功能模块进行运算得到结果，经用户的选择和控制进行输出。整个数据库的产生与运算完全由执行控制系统来控制执行。而执行控制系统允许用户通过 MD Nastran 的语言 DMAP 来控制。

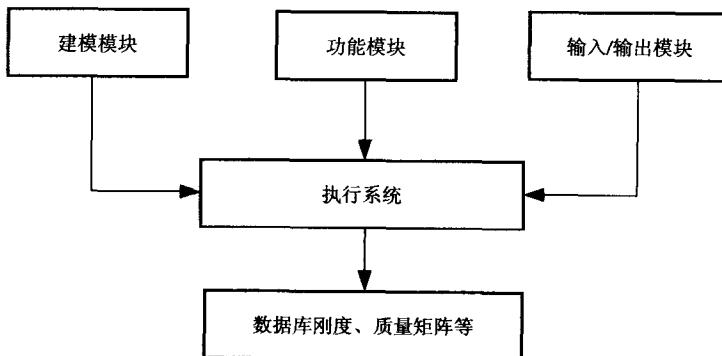


图 1.2 MD Nastran 系统的基本架构

### 1.4 MD Nastran 的输入文件

输入文件以可选的 MD Nastran 语句开始，随后为可选的文件管理段 (FMS)、要求的执行控制段 (Executive Control)、要求的情况控制段 (Case Control)、要求的模型数据段 (Bulk Data)。

### 1.4.1 文件管理段

文件管理段 (FMS) 允许用户控制附加和初始化数据库 (Dbsets) 及 FORTRAN 文件。大多数情况下不要求 (FMS) 段, 因为省略的 FMS 是针对所有情况的。对于已经存在的数据库进行重启是一种例外。

进一步的内容, 有兴趣的读者可参考帮助手册 *MD R2 Nastran Quick Reference Guide* 的第 2 章。

### 1.4.2 问题定义段

问题的定义, 完全由输入文件中用户指定的命令及数据语句所控制。问题的说明包括①定义待解的问题或方程组, ②用户控制的 MD Nastran 输入和输出, ③用户控制的 MD Nastran 执行功能。

MD Nastran 输入文件中剩下的段完成上述功能。问题定义段的组成如下。

- 执行控制段: 完成上述功能 3, 是输入文件的第 1 段。
- 情况控制段: 完成上述功能 2, 是输入文件的第 2 段。
- 模型数据段: 完成上述功能 1, 是输入文件的第 3 段。

这里讨论的问题定义的次序和它们在输入文件中出现的次序是相反的, 因为为了完成一个特定的任务, 用户一般总是首先定义模型数据段 (Bulk Data) 中的有限单元模型, 其次考虑情况控制, 然后定义执行控制。

问题定义段的各个段之间, 由表 1-2 所示的分隔符语句隔开。这些分隔符是每个 MD Nastran 输入数据文件所必需的, 甚至相应的段是空集也要。

表 1-2 分隔符语句

分 隔 符	用 途
CEND	执行控制段结束
BEGIN BULK	情况控制段结束
ENDDATA	模型数据段结束

进一步的内容, 有兴趣的读者可参考帮助手册 *MD R2 Nastran Quick Reference Guide* 的相关内容。

## 1.5 MSC Patran 与 MD Patran

随着世界市场竞争的日趋激烈, 制造厂商们越来越清楚地意识到 CAE 在其产品设计制造过程中的重要地位。由于产品性能仿真所涉及学科的多样性和 CAD 系统间各具特色, 迫切需要能够将多种 CAE 仿真集成在一个易学易用、统一完整的平台上。MSC.Patran 正是从这一角度出发开发的有限元框架式平台, 设计者可以方便地根据自己的需求进行多学科的工程分析和数据交换。因此, MSC.Patran 被广泛应用于航空、航天、汽车、船舶、铁道、机械、制造业、电子、建筑、土木、国防、生物力学、食品包装、教学研究等各个行业。图 1.3 为利用 Patran 创建的汽车分析模型。



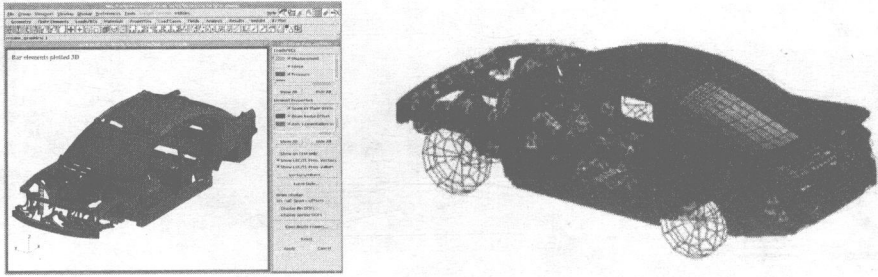


图 1.3 汽车分析模型

MD Patran 和 MSC.Patran 的主要特点如下:

- 符合 CAE 流程的用户界面。
- 极好的兼容性、开放性。
- 强大的客户化定制功能 (PCL 语言)。
- CAD 模型的直接访问技术 (DGA)。
- 高级曲面网格剖分功能, 可在复杂的带有缺陷的曲面上快速生成高质量的面网格, 并提供方便的用户可控性。
- 支持多种 CAE 求解器。
- 独特的复合材料建模工具 LAMINATE MODELER。
- 独特的变量场定义。
- 不同硬件平台和操作系统下数据库兼容。
- 大模型快速图形操作。

除了很简单和很小的模型以外, 输入文件最好由专门的数据生成程序来形成。正如 MSC.Patran 是一个连接 MSC.Nastran 的前后处理程序, MD Patran 是一个连接 MD Nastran 的前后处理程序。MD Patran 由 MSC Patran 发展而来, 主要是为了针对 MD Nastran 的。应用 MD Patran, 用户可以构造并检验模型。MD Patran 创建一个 MD Nastran 的输入文件, 并提交 MD Nastran 分析。当分析完成后, 结果写入一个专门的 MD Nastran OP2 文件。MD Patran 读入 OP2 文件后, 用户可以观察图形形式的结果。MD Patran 为二维或三维分析生成有限单元模型。