

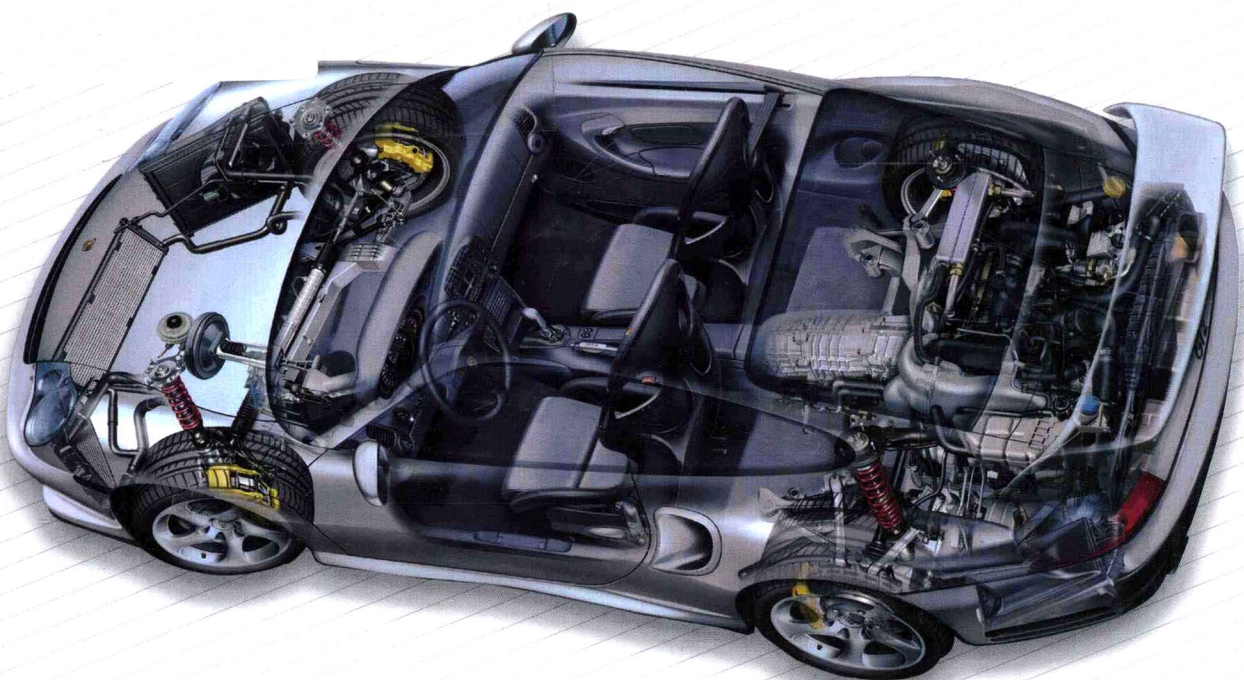


洪如瑾 陆海燕

/ 编著

西门子工业软件（上海）有限公司 / 监制

西门子工业软件官方推荐用书  
全面介绍了NX仿真流程全过程



# NX CAE

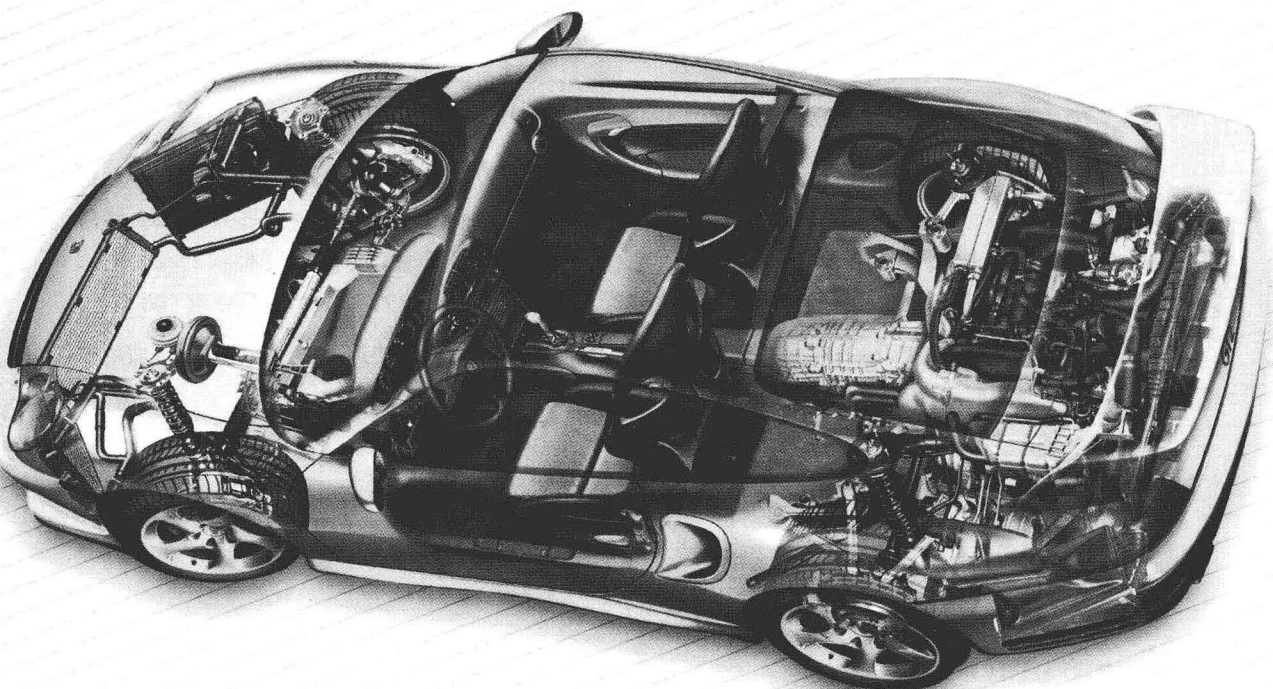
有限元分析所必需的几何模型处理 • 有限元网络生成技术  
几何体抽取和处理 • 模型质量检查 • 边界条件设置 • 结果后处理

## 高级仿真流程



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>



# NX CAE

## 高级仿真流程

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

# 内 容 简 介

NX CAE 提供强大的有限元建模功能和方便的模型处理功能,方便用户快速由设计切换到分析,真正做到设计分析一体化。其被业界证明的核心解算器 Nastran 正被越来越多的用户采用。本书共 26 章,涵盖 NX CAE 仿真快速入门概述(1~8 章)、几何模型处理(9~11 章)、有限元网格生成技术(12~20 章)、几何体抽取和处理(21 章)、边界条件设置(22~24 章)、模型质量检查(25 章)、结果后处理(26 章)。

本书可以作为 NX CAE 的入门指导书,适合于设计工程师和分析工程师快速了解 NX CAE,也适用于想了解 NX CAE 通用前后处理的广大 CAE 专业人士。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

NX CAE 高级仿真流程 / 洪如瑾, 陆海燕编著. —北京: 电子工业出版社, 2012.10

ISBN 978-7-121-18065-1

I. ①N… II. ①洪… ②陆… III. ①工业设计—计算机辅助设计—应用软件 IV. ①TB47-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 201331 号

责任编辑: 王树伟

特约编辑: 赵树刚

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.25 字数: 646.4 千字

印 次: 2012 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010) 88258888。

# 前 言

众所周知, NX 是 Siemens PLM Software 的核心产品之一, 全球有超过 7 万个用户正在使用超过 700 万个使用权, 已经成为工业界的标准。

NX CAE 作为 NX 软件的分析解决方案, 可以帮助用户快速完成繁杂的分析任务、设计效验。NX CAE 通过完全集成的现代环境直接解决用户当前面临的各种仿真挑战, 可带来非常显著的效益。NX CAE 不需要 NX CAD, 可用做独立的前处理器/后处理器, 支持多 CAD 几何模型。NX CAE 可在使用 NX 进行设计的仿真环境中提供更多帮助, 帮助设计团队和分析团队之间完成无缝数据传递。

伴随国家自主创新战略, 我国正在由制造大国转变为创造大国, 对企业设计部门的要求越来越高, 而设计创新的关键支撑技术就是设计分析一体化。为企业提供方便易用、高效可靠、能覆盖从设计部门到专业分析部门的完整的 CAE 解决方案是每个 PLM 厂家不可推脱的责任。

本书面向相关设计工程师和分析人员, 主要介绍了有限元分析所必需的几何模型处理、有限元网格生成技术、几何体抽取和处理、边界条件设置、模型质量检查、结果后处理。

本书作为 NX 学习指导书, 深入浅出, 易于自学。书中先用 8 章的篇幅介绍了分析的全过程, 读者只要按照本书章节顺序, 完成相应的联系, 只用 20 个左右的学时就能入门, 并且对于没有 CAE 基础的学习者也能通过本书了解 CAE 的全过程。后续的 18 章对各个 CAE 专门技术进行详细介绍, 包括 NX 独有的直接建模技术。

## 阅读前期条件

- 具有 NX 建模经验
- 了解有限元分析基本原则

## 适用读者对象

本书可以作为 NX CAE 的入门指导书, 适合于设计工程师和分析工程师快速了解 NX CAE, 也适用于想了解 NX CAE 进行前、后处理的广大 CAE 专业人士。

在本书的出版过程中, 西门子工业软件(上海)有限公司大中国区总裁梁乃明先生和售前技术总监方志刚先生给予了极大的关心, 在此表示感谢!

参与本书编写的人员有黄海、王娟、洪如瑾、吴英祥、曹璨、梁媛媛、张学伟、赵晓宇、陆海燕、夏卫华、文安平、王庆国、卞志坚。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 著 者

## 第 1 部分 分析模型

|                     |    |                              |    |
|---------------------|----|------------------------------|----|
| 第 1 章 高级仿真入门        | 2  | 第 6 章 边界条件                   | 62 |
| 1.1 产品综述            | 2  | 6.1 边界条件                     | 62 |
| 1.2 仿真概述            | 3  | 6.1.1 边界条件综述                 | 62 |
| 1.2.1 有限元分析的步骤      | 3  | 6.1.2 基于几何体与基于有限元的边界条件       | 63 |
| 1.2.2 利用有限元分析       | 4  | 6.1.3 边界条件显示                 | 63 |
| 1.2.3 透明化求解支持       | 7  | 6.2 载荷                       | 64 |
| 1.2.4 求解流程          | 7  | 6.2.1 什么是结构载荷                | 64 |
| 1.3 仿真文件            | 8  | 6.2.2 基于几何体的加载               | 64 |
| 1.3.1 高级仿真文件        | 8  | 6.2.3 预定义载荷                  | 65 |
| 1.3.2 仿真文件数据结构      | 9  | 6.3 约束                       | 68 |
| 1.4 高级仿真工作流程        | 11 | 6.3.1 什么是结构约束                | 68 |
| 1.4.1 工作流程          | 11 | 6.3.2 基于几何体的约束               | 68 |
| 1.4.2 用多个解算方案工作     | 12 | 6.3.3 预定义的约束                 | 69 |
| 1.4.3 用多个仿真文件工作     | 13 | 6.4 管理边界条件                   | 73 |
| 1.4.4 用多个 FEM 文件工作  | 14 | 6.4.1 编辑边界条件                 | 73 |
| 1.5 复习题             | 14 | 6.4.2 删除边界条件                 | 73 |
| 1.6 本章摘要            | 22 | 6.4.3 复制边界条件                 | 74 |
| 第 2 章 仿真导航器         | 23 | 6.4.4 添加边界条件到解法中             | 74 |
| 2.1 利用仿真导航器         | 23 | 6.4.5 重命名边界条件                | 75 |
| 2.2 仿真导航器的功能        | 23 | 6.5 复习题                      | 75 |
| 2.3 仿真导航器视图         | 25 | 6.6 本章摘要                     | 75 |
| 2.4 复习题             | 27 | 第 7 章 解算模型                   | 76 |
| 2.5 本章摘要            | 27 | 7.1 解算                       | 76 |
| 第 3 章 选择实体          | 28 | 7.1.1 解算综述                   | 76 |
| 第 4 章 Teamcenter 集成 | 33 | 7.1.2 在解算前检查模型               | 77 |
| 第 5 章 基本网格生成技术      | 39 | 7.1.3 解算模型                   | 78 |
| 5.1 3D 四面体网格        | 39 | 7.1.4 解算属性                   | 78 |
| 5.1.1 3D 四面体网格特点    | 39 | 7.1.5 输出请求                   | 78 |
| 5.1.2 建立 3D 四面体网格   | 40 | 7.1.6 解算器参数                  | 79 |
| 5.1.3 网格收集器         | 41 | 7.2 NX Nastran 结构和热分析        | 80 |
| 5.1.4 3D 四面体网格质量检查  | 43 | 7.2.1 NX Nastran 结构分析与解算类型 1 | 80 |
| 5.2 2D 映射网格         | 49 | 7.2.2 NX Nastran 结构分析与解算类型 2 | 80 |
| 5.3 本章摘要            | 61 | 7.2.3 NX Nastran 结构分析与       |    |

|                                        |            |                             |            |
|----------------------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| 解算类型 3 .....                           | 80         | 9.2.2 移除特征 .....            | 126        |
| 7.2.4 NX Nastran 结构分析与<br>解算类型 4 ..... | 81         | 9.2.3 分割几何体到多个体 .....       | 127        |
| 7.2.5 NX Nastran 热分析与<br>解算类型 .....    | 81         | 9.2.4 建立中面 .....            | 127        |
| 7.3 NX Nastran 解算文件 .....              | 81         | 9.3 连接体与划分面 .....           | 130        |
| 7.3.1 NX Nastran 解算文件 1 .....          | 81         | 9.3.1 连接体 .....             | 130        |
| 7.3.2 NX Nastran 解算文件 2 .....          | 82         | 9.3.2 划分面 .....             | 130        |
| 7.4 多个解算方案 .....                       | 82         | 9.3.3 修改特征的理想化命令 .....      | 131        |
| 7.5 复习题 .....                          | 84         | 9.4 复习题 .....               | 142        |
| 7.6 本章摘要 .....                         | 84         | 9.5 本章摘要 .....              | 142        |
| <b>第 8 章 后处理 .....</b>                 | <b>85</b>  | <b>第 10 章 几何体修补 .....</b>   | <b>143</b> |
| 8.1 后处理综述 .....                        | 85         | 10.1 几何体修补综述 .....          | 143        |
| 8.1.1 后处理的主要操作 .....                   | 85         | 10.1.1 几何体修补介绍 .....        | 143        |
| 8.1.2 加载分析结果 .....                     | 86         | 10.1.2 了解体与面 .....          | 143        |
| 8.1.3 读入分析结果 .....                     | 87         | 10.1.3 诊断问题 .....           | 144        |
| 8.2 数据分量 .....                         | 87         | 10.2 修复问题 .....             | 146        |
| 8.2.1 存取数据分量 .....                     | 87         | 10.2.1 为曲面建立 3D 曲线 .....    | 146        |
| 8.2.2 数据分量包含的物理量 .....                 | 88         | 10.2.2 建立曲面 .....           | 147        |
| 8.2.3 节点、单元-节点和<br>单元数据类型 .....        | 88         | 10.2.3 添加或移除曲面 .....        | 147        |
| 8.3 后处理视图 .....                        | 89         | 10.3 复习题 .....              | 162        |
| 8.3.1 等高线标绘 .....                      | 89         | 10.4 本章摘要 .....             | 162        |
| 8.3.2 标记标绘 .....                       | 90         | <b>第 11 章 同步建模 .....</b>    | <b>163</b> |
| 8.4 视口 .....                           | 95         | 11.1 同步建模综述 .....           | 163        |
| 8.5 复习题 .....                          | 120        | 11.2 建模模式 .....             | 164        |
| 8.6 本章摘要 .....                         | 121        | 11.3 同步建模工具条 .....          | 164        |
|                                        |            | 11.4 更新已存网格 .....           | 165        |
|                                        |            | 11.5 复习题 .....              | 173        |
|                                        |            | 11.6 本章摘要 .....             | 173        |
| <b>第 2 部分 模型准备</b>                     |            | <b>第 3 部分 网格划分技术</b>        |            |
| <b>第 9 章 几何体理想化 .....</b>              | <b>124</b> | <b>第 12 章 网格收集器 .....</b>   | <b>176</b> |
| 9.1 几何体理想化综述 .....                     | 124        | 12.1 网格收集器综述 .....          | 176        |
| 9.1.1 什么是几何体理想化 .....                  | 124        | 12.2 建立与编辑网格收集器 .....       | 177        |
| 9.1.2 CAE 工作流的<br>相关复制技术 .....         | 124        | 12.3 编辑网格收集器显示特性 .....      | 179        |
| 9.2 简化几何体 .....                        | 125        | 12.4 复习题 .....              | 179        |
| 9.2.1 移除细节与特征 .....                    | 125        | 12.5 本章摘要 .....             | 179        |
|                                        |            | <b>第 13 章 材料与物理特性 .....</b> | <b>180</b> |

|                                |            |                               |            |
|--------------------------------|------------|-------------------------------|------------|
| 13.1 材料特性 .....                | 180        | 17.1.7 显示梁网格 .....            | 238        |
| 13.2 物理特性 .....                | 183        | 17.1.8 请求力输出 .....            | 239        |
| 13.3 复习题 .....                 | 197        | 17.1.9 梁单元后处理 .....           | 240        |
| 13.4 本章摘要 .....                | 197        | 17.2 练习 .....                 | 243        |
| <b>第 14 章 单元尺寸与网格密度 .....</b>  | <b>198</b> | 17.3 复习题 .....                | 263        |
| 14.1 单元尺寸 .....                | 198        | 17.4 本章摘要 .....               | 263        |
| 14.2 网格密度 .....                | 200        | <b>第 18 章 3D 扫掠网格 .....</b>   | <b>264</b> |
| 14.3 复习题 .....                 | 209        | 18.1 3D 扫掠网格综述 .....          | 264        |
| 14.4 本章摘要 .....                | 209        | 18.2 创建扫掠网格 .....             | 265        |
| <b>第 15 章 1D 连接 .....</b>      | <b>210</b> | 18.2.1 扫掠网格类型 .....           | 265        |
| 15.1 1D 连接综述 .....             | 210        | 18.2.2 控制在源面上的网格 .....        | 266        |
| 15.2 基于几何体与基于 FE<br>连接比较 ..... | 211        | 18.2.3 创建 3D 扫掠网格 .....       | 266        |
| 15.3 连接类型 .....                | 211        | 18.3 复习题 .....                | 276        |
| 15.3.1 边-面连接 .....             | 211        | 18.4 本章摘要 .....               | 276        |
| 15.3.2 点-点连接 .....             | 212        | <b>第 19 章 人工网格划分 .....</b>    | <b>277</b> |
| 15.3.3 蜘蛛单元 .....              | 212        | 19.1 3D 人工网格划分综述 .....        | 277        |
| 15.4 复习题 .....                 | 227        | 19.2 创建与复制节点 .....            | 278        |
| 15.5 本章摘要 .....                | 227        | 19.2.1 创建节点 .....             | 278        |
| <b>第 16 章 网格连接 .....</b>       | <b>228</b> | 19.2.2 复制节点 .....             | 278        |
| 16.1 网格配对条件 .....              | 228        | 19.3 创建与复制单元 .....            | 279        |
| 16.2 网格连接步骤 .....              | 229        | 19.3.1 创建单元 .....             | 279        |
| 16.2.1 定义点到点接触 .....           | 229        | 19.3.2 拉伸与旋转单元 .....          | 279        |
| 16.2.2 定义在面间的接触 .....          | 230        | 19.3.3 复制单元 .....             | 280        |
| 16.2.3 点焊建模 .....              | 230        | 19.4 修改节点与单元 .....            | 280        |
| 16.2.4 螺栓连接建模 .....            | 230        | 19.4.1 修改节点位置 .....           | 280        |
| 16.3 复习题 .....                 | 233        | 19.4.2 修改 2D 单元 .....         | 281        |
| 16.4 本章摘要 .....                | 233        | 19.4.3 修改单元连接 .....           | 281        |
| <b>第 17 章 梁单元建模 .....</b>      | <b>234</b> | 19.5 管理节点与单元 .....            | 282        |
| 17.1 创建梁模型 .....               | 234        | 19.5.1 管理节点与单元命令 .....        | 282        |
| 17.1.1 使用 1D 网格创建梁模型 .....     | 234        | 19.5.2 更多的管理节点与<br>单元命令 ..... | 282        |
| 17.1.2 创建梁单元的模型准备 .....        | 235        | 19.6 复习题 .....                | 300        |
| 17.1.3 创建 1D 网格 .....          | 236        | 19.7 本章摘要 .....               | 300        |
| 17.1.4 确保单元定位一致 .....          | 236        | <b>第 20 章 网格质量 .....</b>      | <b>301</b> |
| 17.1.5 1D 单元截面 .....           | 237        | 20.1 网格质量综述 .....             | 301        |
| 17.1.6 横截面方位与偏置 .....          | 238        | 20.2 检查单元质量 .....             | 302        |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 20.2.1 | 检查单元形状 .....           | 302 |
| 20.2.2 | 设置临界值 .....            | 302 |
| 20.2.3 | 改进单元形状 .....           | 303 |
| 20.2.4 | 显示单元轮廓与面 .....         | 303 |
| 20.3   | 检查网格质量 .....           | 303 |
| 20.3.1 | 合并重合的节点 .....          | 303 |
| 20.3.2 | 反向单元法向 .....           | 303 |
| 20.3.3 | 检查节点与几何体的<br>邻近度 ..... | 304 |
| 20.3.4 | 检查材料与物理特性 .....        | 305 |
| 20.3.5 | 检查模型 .....             | 305 |
| 20.4   | 复习题 .....              | 311 |
| 20.5   | 本章摘要 .....             | 311 |

## 第 4 部分 多边形几何体工作

|        |                          |     |
|--------|--------------------------|-----|
| 第 21 章 | 几何体提取 .....              | 314 |
| 21.1   | 几何体提取技术 .....            | 314 |
| 21.1.1 | 几何体提取综述 .....            | 314 |
| 21.1.2 | 多边形几何体 .....             | 314 |
| 21.1.3 | 几何体提取与几何体<br>理想化比较 ..... | 315 |
| 21.1.4 | 几何体提取过程 .....            | 315 |
| 21.2   | 边与面操作 .....              | 316 |
| 21.2.1 | 分割单个边 .....              | 316 |
| 21.2.2 | 分割一个面 .....              | 316 |
| 21.2.3 | 合并两个边 .....              | 316 |
| 21.2.4 | 合并两个多边形面 .....           | 317 |
| 21.2.5 | 缝合边 .....                | 317 |
| 21.2.6 | 压缩短边 .....               | 318 |
| 21.2.7 | 修复多边形面 .....             | 318 |
| 21.2.8 | 恢复提取的多边形<br>几何体 .....    | 318 |
| 21.3   | 复习题 .....                | 333 |
| 21.4   | 本章摘要 .....               | 333 |

## 第 5 部分 边界条件类型与技术

|        |              |     |
|--------|--------------|-----|
| 第 22 章 | 边界条件类型 ..... | 336 |
|--------|--------------|-----|

|        |                      |     |
|--------|----------------------|-----|
| 22.1   | 结构载荷 .....           | 336 |
| 22.1.1 | 力 .....              | 336 |
| 22.1.2 | 作用分量力 .....          | 337 |
| 22.1.3 | 作用边-面力 .....         | 338 |
| 22.1.4 | 轴承载荷 .....           | 338 |
| 22.2   | 结构约束 .....           | 339 |
| 22.2.1 | 定义用户定义的约束 .....      | 339 |
| 22.2.2 | 定义强制位移约束 .....       | 340 |
| 22.2.3 | 销钉约束 .....           | 341 |
| 22.3   | 复习题 .....            | 349 |
| 22.4   | 本章摘要 .....           | 349 |
| 第 23 章 | 边界条件技术 .....         | 350 |
| 23.1   | 边界条件显示与管理 .....      | 350 |
| 23.1.1 | 边界条件显示 .....         | 350 |
| 23.1.2 | 边界条件管理 .....         | 350 |
| 23.2   | 仿真坐标系 .....          | 351 |
| 23.2.1 | 全局（绝对）坐标系 .....      | 351 |
| 23.2.2 | 工作坐标系 .....          | 352 |
| 23.2.3 | 局部坐标系 .....          | 352 |
| 23.2.4 | 节点坐标系 .....          | 353 |
| 23.3   | 排除对象 .....           | 353 |
| 23.4   | 约束冲突解析 .....         | 354 |
| 23.5   | 复习题 .....            | 366 |
| 23.6   | 本章摘要 .....           | 366 |
| 第 24 章 | 在边界条件中利用域（场） .....   | 367 |
| 24.1   | 域综述 .....            | 367 |
| 24.1.1 | 利用域 .....            | 367 |
| 24.1.2 | 域类型 .....            | 367 |
| 24.1.3 | 用域定义边界条件 .....       | 368 |
| 24.2   | 在边界条件中利用域 .....      | 368 |
| 24.2.1 | 由标准边界条件利用域 .....     | 368 |
| 24.2.2 | 由空间边界条件利用域 .....     | 369 |
| 24.2.3 | 用公式域定义力 .....        | 369 |
| 24.2.4 | 定义空间法向压力载荷 .....     | 370 |
| 24.3   | 分离（Breakout）建模 ..... | 371 |
| 24.3.1 | 分离建模综述 .....         | 371 |
| 24.3.2 | 分离建模用途 .....         | 371 |
| 24.3.3 | 分离建模工作流 .....        | 372 |

|        |                   |     |        |               |     |
|--------|-------------------|-----|--------|---------------|-----|
| 24.4   | 复习题 .....         | 385 | 第 26 章 | 报告 .....      | 389 |
| 24.5   | 本章摘要 .....        | 385 | 26.1   | 建立报告 .....    | 389 |
| 第 25 章 | 模型质量 .....        | 386 | 26.2   | 写出报告 .....    | 390 |
| 25.1   | 检查模型 .....        | 386 | 26.3   | 添加图像到报告 ..... | 390 |
| 25.2   | 检查边界条件 .....      | 387 | 26.4   | 练习 .....      | 391 |
| 25.3   | 检查解算方案 .....      | 387 | 26.5   | 复习题 .....     | 392 |
| 25.4   | 首先运行一线性静态求解 ..... | 388 | 26.6   | 本章摘要 .....    | 393 |
| 25.5   | 复习题 .....         | 388 |        |               |     |
| 25.6   | 本章摘要 .....        | 388 |        |               |     |



# 第1部分 分析模型

- ▶ 第1章 高级仿真入门
- ▶ 第2章 仿真导航器
- ▶ 第3章 选择实体
- ▶ 第4章 Teamcenter 集成
- ▶ 第5章 基本网格生成技术
- ▶ 第6章 边界条件
- ▶ 第7章 解算模型
- ▶ 第8章 后处理



# 第 1 章 高级仿真入门

## 本章将学习：

- 产品综述。
- 仿真概述。
- 练习。

## 1.1 产品综述

高级仿真是一个综合性的有限元建模和结果可视化的产品，旨在满足设计工程师与分析师的需要。高级仿真包括一整套前处理和后处理工具，并支持广泛的产品性能评估方法。

高级仿真提供基本设计仿真中需要的所有功能，并支持高级分析流程的众多其他功能。

- 高级仿真的数据结构很有特色。例如具有独立的仿真文件和 FEM 文件，这有利于在分布式工作环境中开发有限元（FE）模型。这些数据结构还允许分析师轻松地共享 FE 数据去执行多种类型分析。
- 高级仿真提供世界级的网格划分功能。该软件旨在用经济的单元数量来产生高质量网格。结构仿真支持完整的单元类型（0D、1D、2D 和 3D）。另外，结构级仿真使分析师能够控制特定网格公差。例如，用这些公差控制软件对复杂几何体（例如圆角）划分网格。
- 高级仿真包括许多几何体简化工具，使分析师能够根据其分析需要来量身定制 CAD 几何体。例如，分析师可以使用这些工具提高其网格的整体质量，方法是消除有问题的几何体（如微小的边）。



### 仿真可以为你做什么

验证设计的传统方法是构建一个原型样机并测试它。如果测试中发现设计存在问题，应当修改设计，并且重新开发与测试原型样机。

利用有限元分析（FEA）是另一种验证设计方法。FEA 有以下优点：

- 可仿真如何在一个虚拟环境中执行产品。
- 可通过减少原型样机从而减少产品成本与开发时间。
- 可优化设计。

如图 1-1 所示为物理样机和有限元仿真验证。

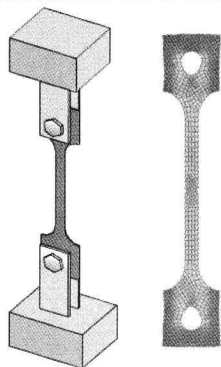


图 1-1 物理样机与仿真验证

如图 1-2 所示为高级仿真的界面。

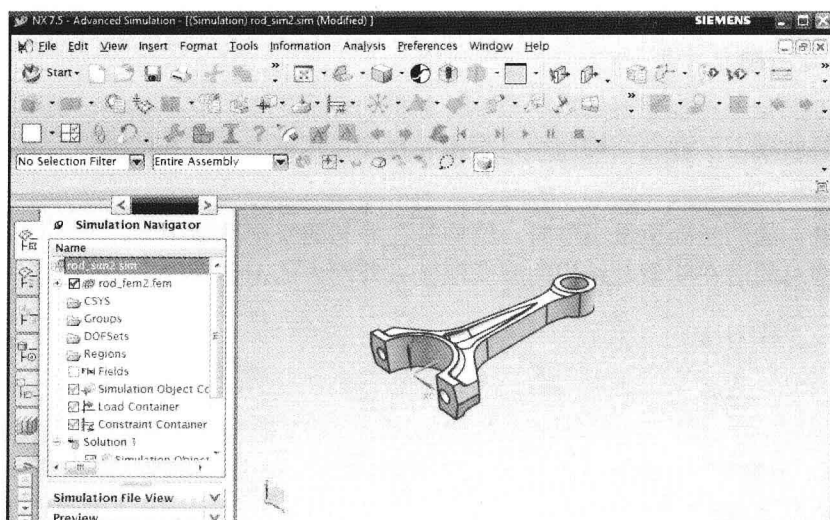


图 1-2 高级仿真界面

## 1.2 仿真概述

### 1.2.1 有限元分析的步骤

有限元常规分析的步骤（如图 1-3 所示）如下。

- Step 01** 获得一个部件或装配件模型，确定所需的分析、边界条件和结果。
- Step 02** 选择求解器（如 NX Nastran）。
- Step 03** 理想化部件。
- Step 04** 在部件上创建网格，包括所需要的材料和物理数据。
- Step 05** 施加第 1 步中确定的边界条件（载荷和约束）。
- Step 06** 求解模型。

## Step 07 查看结果并准备报告。

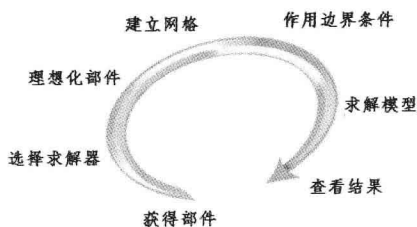


图 1-3 有限元分析流程图

## 1.2.2 利用有限元分析

当没有详细的解决方案时，有限元分析可帮助你了解该结构的响应，如图 1-4 所示。

## 什么是有限元方法

有限元方法是一种理想的适用于数字计算机的计算方案，它从结构、流体机械和热传递等方面求解问题。对静态结构问题，有限元程序可以从一个潜在的能量公式导得。此公式的基础是：

- 当潜在的能量处于最小值时，结构是在静态的平衡环境中。
- 结构总的潜在能量是结构的应变能减去外部力的工作潜能，如图 1-5 所示。

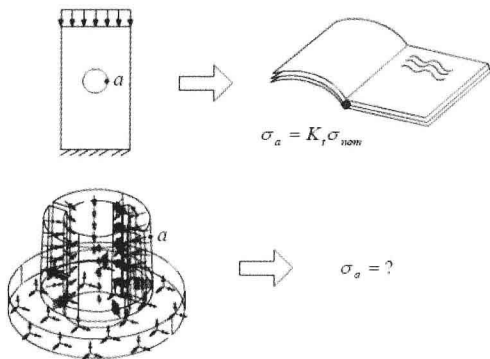


图 1-4 利用有限元分析

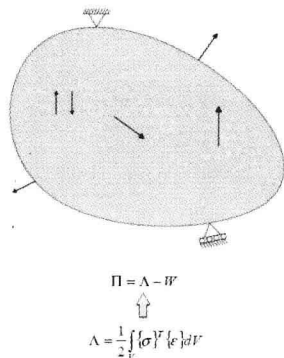


图 1-5 结构总的潜在能量

## 有限元网格

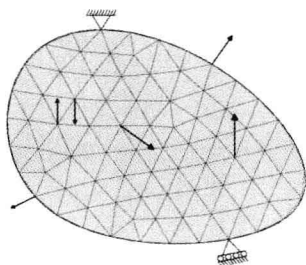
通过分割结构到称为单元的离散区建立有限单元网格，单元连接处的点称为节点。对于有限元网格：

- 2D 单元是像三角形和四边形的简单几何形状，3D 单元是四面体和六面体。
- 节点是一些位置，需要指定这些位置的力和位移约束，计算反作用力和未知位移。
- 结构的应变能是单元的应变能总和，如图 1-6 所示。

## 假定的位移域

为了计算单元应变能量的表达式，对单元假定一位移域：

- 用节点位移算出假定的位移域。
- 单元内任一位置的位移可以从节点位移内插而来。
- 内插函数称为形状函数。
- 单元应变域通过微分假定的位移域求得，如图 1-7 所示。

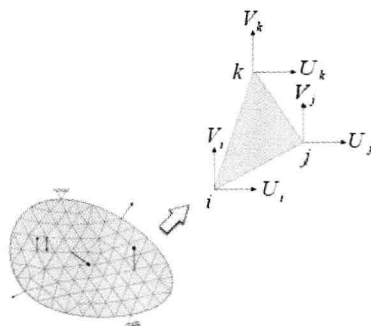


$$\Lambda = \sum_{(e)} \Lambda^{(e)}$$

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(e)}} \{\sigma^{(e)}\}^T \{\epsilon^{(e)}\} dV$$

$$\{\sigma^{(e)}\}^T = \{\epsilon^{(e)}\}^T [E^{(e)}]$$

图 1-6 有限单元网格与单元的应变能



$$\{d^{(e)}\} = [N^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots$$

$$\{\epsilon^{(e)}\} = [B^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

图 1-7 单元应变域

### 单元刚度

利用单元应变域，单元应变能表示为节点位移和单元刚度矩阵。

在单元刚度矩阵中的条目通过积分得到，如图 1-8 所示。

### 平衡方程

通过最小化结构的总的潜在能量得到平衡方程。方法如下：

- 定义一个含有所有节点位移的全局位移矢量。
- 结构的总的应变能量表示为全局位移矢量与一个表示整个结构刚度称为全局刚度矩阵的矩阵。
- 全局位移矢量用于形成外部力工作潜能的表达式，如图 1-9 所示。

$$[k^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [E^{(e)}] [B^{(e)}] dV$$

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \{D^{(e)}\}^T [k^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(e)}} \{\epsilon^{(e)}\}^T [E^{(e)}] \{\epsilon^{(e)}\} dV$$

$$\{\epsilon^{(e)}\} = [B^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

图 1-8 单元刚度矩阵

$$\Pi = \frac{1}{2} \{D\}^T [K] \{D\} - \{D\}^T \{F\}$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{D\}} = 0$$

$$[K] \{D\} = \{F\}$$

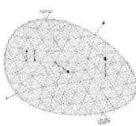
图 1-9 全局位移矢量

### 全局刚度

全局刚度矩阵由单元刚度矩阵建立。

单元刚度矩阵的增加值与全局位移矢量相适应。

每个单元刚度矩阵贡献的总和产生全局刚度矩阵，如图 1-10 所示。



$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \{D^{(e)}\}^T [K^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

$$\Downarrow$$

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \{D\}^T [K^{(e)}] \{D\}$$

$$\Downarrow \quad \Lambda = \sum_{(e)} \Lambda^{(e)}$$

$$[K] = \sum_{(e)} [K^{(e)}]$$

图 1-10 全局刚度矩阵

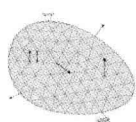
### 求解与结果恢复

一旦计算了全局刚度矩阵，平衡方程可以分块去分解未知的节点位移和已知的节点位移。

其中节点位移是已知的，反作用是未知的。

其中节点位移是未知的，外部力是已知的。

一旦计算了未知的节点位移，其他结果可以被恢复，如图 1-11 所示。



$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{12} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_U \\ D_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P \\ R \end{Bmatrix}$$

$$\Downarrow$$

$$\{D_U\} = [K_{11}]^{-1} (\{P\} - [K_{12}] \{D_0\})$$

$$\Downarrow$$

$$\{R\} = [K_{12}] \{D_U\} + [K_{22}] \{D_0\}$$

$$\Downarrow$$

$$\{D\}$$

$$\Downarrow$$

$$\{\epsilon^{(e)}\} = [B^{(e)}] \{D^{(e)}\}$$

$$\Downarrow$$

$$\{\sigma^{(e)}\} = \{\epsilon^{(e)}\} [E^{(e)}]$$

图 1-11 求解

### NX 支持的求解器

NX 支持的求解器包括：

- NX Nastran, NX Nastran Design。
- NX Space System Thermal。

- NX Thermal/Flow。
- NX Electronic System Cooling。
- MSC Nastran。
- ANSYS。
- ABAQUS。
- LS-Dyna。

### 1.2.3 透明化求解支持

当选定求解器和分析类型后，软件即使用设定的解算器语言。

如图 1-12 和图 1-13 所示分别为针对 Nastran 和 ANSYS 求解器的 2D 单元的网格创建对话框。

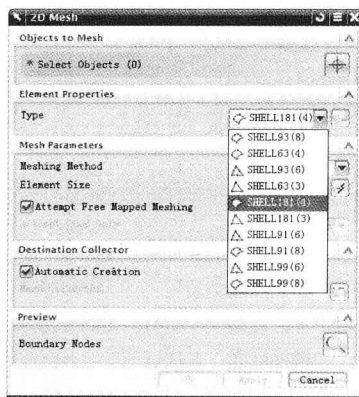
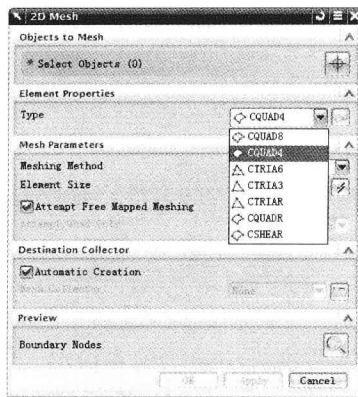


图 1-12 Nastran 支持的 2D 单元的网格创建对话框

图 1-13 ANSYS 支持的 2D 单元的网格创建对话框

### 1.2.4 求解流程

当在 NX 环境下求解一个仿真模型时，会创建所设定求解器的输入文件。默认将该文件写入、保存到仿真文件 (\*.sim) 同一目录中。

**Step 01** NX 建立一个输入文件，此文件通常是 ASCII 文件，其中包含网格、边界条件和求解器参数。

**Step 02** 求解器运行一批处理解算。

**Step 03** NX 读取后处理中的结果文件，并显示结果。



**注意**

解算结果文件和求解器的输入文件在同一个目录中，而且文件的前缀也类似输入文件的前缀。

如图 1-14 所示为一个连杆分析实例。