内附光盘

Pro/ENGINEER工程师之路丛书

Pro/ENGINEER Wildfire

结构分析

张继春　徐斌　林波　编著

机械工业出版社
China Machine Press

ISBN 7-111-14140-7/TP·3503

策划编辑：吴宏伟
责任编辑：郭新义 封面设计：李 瞳

Pro/ENGINEER 工程师之路丛书

1. 《Pro/ENGINEER Wildfire 综合培训教程》
2. 《Pro/ENGINEER Wildfire 快速入门教程》
3. 《Pro/ENGINEER Wildfire 基础设计》
4. 《Pro/ENGINEER Wildfire 高级设计》
5. 《Pro/ENGINEER Wildfire 曲面设计》
6. 《Pro/ENGINEER Wildfire 钣金件设计》
7. 《Pro/ENGINEER Wildfire 装配设计》
8. 《Pro/ENGINEER Wildfire 工程图设计》
9. 《Pro/ENGINEER Wildfire 模具设计》
10. 《Pro/ENGINEER Wildfire 数控加工》
11. 《Pro/ENGINEER Wildfire 结构分析》
12. 《Pro/TOOLKIT 程序设计》
13. 《Pro/ENGINEER Wildfire 中文版范例教程》
14. 《Pro/ENGINEER Wildfire 产品设计与机构动力学分析》
15. 《Pro/ENGINEER Wildfire 在企业的实施与应用》

AutoCAD 2004 工程师之路丛书

1. 《中文 AutoCAD 2002/2004 综合培训教程》
2. 《AutoCAD 2004 中文版通用实例教程》
3. 《AutoCAD 2004 中文版建筑绘图实例教程》
4. 《AutoCAD 2004 中文版机械设计实例教程》
5. 《AutoCAD 2004 中文版环境艺术设计实例教程》

ANSYS 7.0 应用指导系列丛书

1. 《ANSYS 7.0 基础教程》
2. 《有限元基础和 ANSYS 入门》
3. 《 ANSYS 高级分析》
4. 《ANSYS 分析实例与工程应用》

ISBN 7-111-14140-7

9 787111 141402 >

定价：48.00 元(含 1CD)

地址：北京市百万庄大街 22 号 邮政编码：100037
联系电话：(010) 68326294 网址：http://www.cmpbook.com
E-mail:online@cmpbook.com

Pro/ENGINEER 工程师之路丛书

Pro/ENGINEER Wildfire结构分析

张继春 徐斌 林波 编著

机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了使用Pro/MECHANICA进行结构分析的一般过程和使用方法。主要内容包括：Pro/MECHANICA 基础、入门实例、自动网格划分、物性材料的定义、约束的定义、载荷的定义、梁模型分析、薄壳模型、灵敏度分析与优化设计、平面问题分析、对称问题处理、结构动力学分析、屈曲分析、疲劳分析初步、FEM 模块使用介绍以及独立模式等。

本书主要特点是：论述简单明了、重点突出；实例丰富、易学易会。所附光盘包含了本书全部实例文件。

本书的内容体现了集成CAD/CAE 软件进行结构分析和优化设计的基本思想，是广大工程工作者进行机械动态设计不可多得的参考资料，同时也可以作为教材供高校高年级本科生和研究生学习有限元分析课程使用。

图书在版编目（CIP）数据

Pro/ENGINEER Wildfire 结构分析/张继春等编著.

-北京：机械工业出版社，2004.4

（Pro/ENGINEER 工程师之路丛书）

ISBN 7-111-14140-7

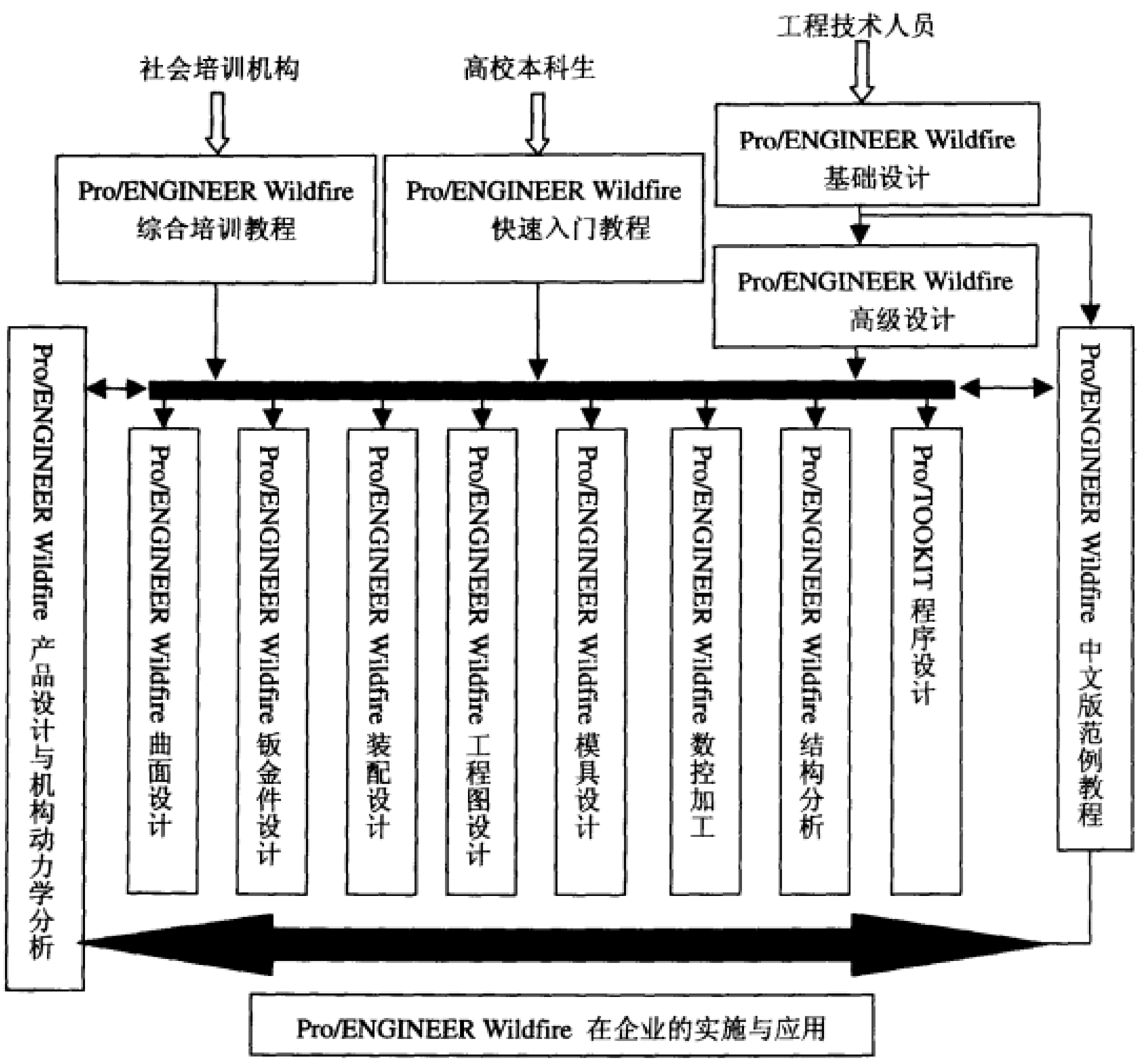
Ⅰ.P… Ⅱ.张… Ⅲ.机械设计：计算机辅助设计-应用软件，Pro/ENGINEER
Ⅳ.TH122

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第017956号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：吴宏伟　责任编辑：郭新义
版式设计：谭奕丽　责任印制：施　红
北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2004年4月第1版第1次印刷
787mm×1092mm 1/16·31.5印张·778千字
0001-4000册
定价：48.00元（含1CD）

“Pro/ENGINEER 工程师之路”

丛书导读图



前　　言

Pro/ENGINEER Wildfire 是美国参数化技术公司推出的一整套 CAD/CAM/CAE 集成解决方案，是目前国际上专业设计人员使用最为广泛、先进、具有多种功能的动态设计仿真软件系统。Pro/ENGINEER Wildfire 软件包主要包括 Pro/ENGINEER 和 Pro/MECHANICA 两部分，而这两部分的无缝集成恰恰是美国参数化技术公司能够在国际 CAD/CAM/CAE 市场遥遥领先的根本原因。

“无缝集成”是使用 Pro/ENGINEER 的有限元工程师选择 Pro/MECHANICA 作为分析工具的主要理由。因为有了 Pro/MECHANICA，有限元工程师们不用再为 IGES 等文件格式的数据丢失而对几何模型进行缝缝补补，因此能够节省近 2/3 的工作量。

使用 Pro/MECHANICA 进行有限元分析非常简单，读者可以在熟悉的 Pro/ENGINEER 界面下直接在几何模型的点、线、面上定义载荷和约束边界条件，至于有限元网格划分，完全可以由 Pro/MECHANICA 自己去完成。归纳使用 Pro/MECHANICA 进行有限元分析的体会，作者最想说的词语就是前两年流行的“傻瓜型”。所谓“傻瓜型”，也就是高智能型，Pro/MECHANICA 甚至可以让那些丝毫没有工程力学背景的工程师去完成以前一看就头大的有限元分析工作。

可是对于 Pro/MECHANICA，这种易学易用的有限元分析软件，国内却没有一本书籍详细介绍其使用方法的（虽然介绍 Pro/ENGINEER 几何建模的书籍摞起来差不多有两米多高）。根据广大工程工作者对于 Pro/MECHANICA 书籍的迫切需要，笔者本着简单、易用、易学、易懂的出发点编写了此书。

本书由张继春、徐斌、林波编著，景疆辉、王永光、王伟东等也为本书的编写做了大量的工作。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工业大学汽车工程学院院长崔胜民教授的关怀和支持，得到了哈尔滨工业大学（威海）科研处处长盖玉先教授的大力指导，得到了汽车工程学院杨建国副教授、张兆合副教授、赵桂范副教授、张京明副教授、刘会英副教授等的关心与帮助，谨向他们表示衷心的感谢！

本书在编写过程中还得到了各界同仁和朋友的大力支持、鼓励和帮助，并参阅了 PTC 公司的相关资料，在此一并表示感谢！

最后要感谢的是毕慧玉女士，没有她默默的支持、理解和鼓励，本书无法完成。

由于作者水平有限，书中难免会有错误和疏漏之处，欢迎广大读者批评指正。

编者

目　　录

第 1 章　Pro/MECHANICA 基础 1
1.1　Pro/MECHANICA 简介 2
1.1.1　Pro/MECHANICA 模块简介 2
1.1.2　Pro/MECHANICA 的工作模式 2
1.2　Pro/MECHANICA STRUCTURE 概述 4
1.2.1　Pro/MECHANICA STRUCTURE 的主要功能 4
1.2.2　Pro/MECHANICA STRUCTURE 的分析类型 4
1.2.3　模型和单元类型 5
1.3　Pro/MECHANICA 技术基础 5
1.3.1　P-method 与 H-method 的比较 5
1.3.2　3 种收敛方法 6
1.3.3　使用 Pro/MECHANICA 的一般过程 7
1.4　Pro/MECHANICA 的安装 7
1.4.1　安装前的准备 8
1.4.2　安装 Pro/ENGINEER 与 Pro/MECHANICA 8
1.4.3　连接 Pro/ENGINEER 与 Pro/MECHANICA 9
1.5　实例练习 10
1.5.1　练习一：熟悉 Pro/MECHANICA 界面 10
1.5.2　练习二：立方体的基本应力分析 12

第 2 章　入门实例 21
2.1　Pro/MECHANICA 分析任务分类 22
2.2　入门实例 23
2.2.1　有限元模型的建立 23
2.2.2　进行基本应力分析 28
2.2.3　进行模型的灵敏度分析 32
2.2.4　优化设计分析 42

第 3 章　自动网格划分 49
3.1　AutoGEM 的概念及用法 50
3.1.1　AutoGEM 概述 50
3.1.2　实例练习 50

3.2 CAD 模型的简化........52
3.2.1 问题的提出........52
3.2.2 模型检查方法........53
3.2.3 AutoGEM 网格划分困难的情况举例........53
3.2.4 模型简化时的特征处理........54

第 4 章 物性材料的定义........57
4.1 材料的基本特性........58
4.1.1 杨氏模量........58
4.1.2 泊松比........58
4.1.3 热膨胀系数........58
4.2 单位系统........59
4.3 实例练习........59
4.3.1 结构分析中材料的分配练习........59
4.3.2 材料库的相关操作和练习........63

第 5 章 约束的定义........67
5.1 约束概述........68
5.2 约束和约束组........69
5.3 实例练习........69
5.3.1 点约束的应用........69
5.3.2 线约束的使用........72
5.3.3 面约束的使用........73
5.3.4 坐标系约束的使用........74
5.3.5 对称约束的使用........77
5.3.6 圆周对称约束的使用........79

第 6 章 载荷的定义........83
6.1 载荷概述........84
6.2 实例练习........84
6.2.1 点载荷定义练习........84
6.2.2 线载荷的定义........87
6.2.3 面载荷的定义........94
6.2.4 压力载荷定义........97
6.2.5 重力载荷定义........99
6.2.6 轴承载荷练习........100
6.2.7 离心载荷的定义........102

第 7 章 梁模型分析........105

目 录

7.1 梁模型分析简介 106
7.2 梁模型分析实例 106
7.2.1 集中载荷实例 106
7.2.2 分布载荷实例 120
7.2.3 2D 架构模型实例 131
7.2.4 3D 构架模型实例 142

第 8 章 薄壳模型 153
8.1 薄壳模型概述 154
8.1.1 薄壳模型简介 154
8.1.2 应用薄壳模型的一般步骤 154
8.2 薄壳模型分析实例 155
8.2.1 自动检测薄壳面对模型实例 155
8.2.2 手工创建薄壳面对实例 162
8.2.3 实体—薄壳混合模型实例 170

第 9 章 灵敏度分析与优化设计 179
9.1 灵敏度分析 180
9.1.1 灵敏度分析概述 180
9.1.2 灵敏度分析界面及分类 180
9.2 优化设计 182
9.3 实例练习 184
9.3.1 静态分析 184
9.3.2 灵敏度分析 191
9.3.3 优化设计 207

第 10 章 平面问题分析 219
10.1 平面问题综述 220
10.1.1 平面问题的提出 220
10.1.2 平面应力问题 220
10.1.3 平面应变问题 221
10.1.4 对称性的利用 222
10.1.5 Pro/MECHANICA 中的平面模型 222
10.2 平面应力模型分析 223
10.2.1 平面应力模型叙述 223
10.2.2 扳手平面应力模型实例练习 224
10.2.3 扳手三维实体模型分析 237
10.3 平面应变模型分析 246
10.3.1 平面应变模型叙述 246

10.3.2 实例练习 247

第 11 章 对称问题处理 259

11.1 对称性综述 260

11.1.1 对称的含义 260

11.1.2 平面对称问题 260

11.1.3 轴对称问题 261

11.1.4 圆周对称问题 261

11.1.5 对称性利用中的特殊问题......262

11.2 平面对称 263

11.3 轴对称问题处理 267

11.3.1 轴对称问题综述 267

11.3.2 轴对称实体 268

11.3.3 轴对称壳体 274

11.4 圆周对称 292

11.4.1 Pro/MECHANICA 中的圆周对称问题......292

11.4.2 圆周对称实体实例练习......293

第 12 章 结构动力学分析 303

12.1 模态分析 304

12.1.1 模态分析简述 304

12.1.2 模态分析实例 305

12.1.3 实体模型的模态分析 309

12.2 动态时域分析 313

12.2.1 动态时域分析简介 313

12.2.2 动态时域分析实例 314

12.3 动态频域分析 329

12.3.1 动态频域分析简介 329

12.3.2 动态频域分析实例 329

12.4 随机振动分析 339

12.4.1 随机振动分析简述 339

12.4.2 随机振动分析实例 339

12.5 动态冲击分析 345

12.5.1 动态冲击分析简述 345

12.5.2 动态冲击分析实例 345

12.6 小结 349

第 13 章 屈曲分析 351

13.1 屈曲分析的基本定义 352

13.1.1　屈曲的基本概念 352
13.1.2　屈曲基本理论 352
13.1.3　Pro/MECHANICA 中处理屈曲问题的方法 353
13.1.4　屈曲分析的步骤 354
13.2　压杆屈曲分析 354
13.3　平板曲屈分析 362

第 14 章　疲劳分析初步 369
14.1　疲劳分析概述 370
14.2　疲劳分析实例一——转轴的疲劳分析 370
14.3　疲劳分析实例二——活塞的疲劳分析 378

第 15 章　FEM 模块使用介绍 385
15.1　FEM 工作流程简介 386
15.1.1　建立有限元模型 386
15.1.2　定义分析任务 386
15.1.3　网格划分 386
15.1.4　求解任务 386
15.2　FEM 网格划分 387
15.2.1　H-Method 网格与 P-Method 网格 387
15.2.2　有限元单元的种类 387
15.2.3　网格的控制 387
15.3　FEM 实例练习 388
15.4　ANSYS 解算器的使用 395
15.4.1　ANSYS 解算器的设置 395
15.4.2　实例一——在线计算 395
15.4.3　实例二——后台计算 398
15.5　MSC/NASTRAN 解算器的使用 399
15.5.1　MSC/NASTRAN 解算器的设定 399
15.5.2　使用实例 399

第 16 章　独立模式 405
16.1　独立模式概述 406
16.2　实例练习一 406
16.3　实例练习二 415
16.4　实例练习三 424
16.4.1　建立模型 425
16.4.2　定义材料、载荷、约束 445
16.4.3　建立、运行分析任务 452

16.4.4 显示结果 454
16.5 实例练习四 458
16.5.1 有限元模型的创建 458
16.5.2 建立并求解分析任务 464
16.5.3 灵敏度分析与优化设计 469

第 1 章

Pro/MECHANICA 基础

本章介绍 Pro/MECHANICA 的基础知识，主要内容包括：

- ✦ Pro/MECHANICA 简介
- ✦ Pro/MECHANICA STRUCTURE 概述
- ✦ Pro/MECHANICA 技术基础
- ✦ Pro/MECHANICA 的安装
- ✦ 实例练习

1.1 Pro/MECHANICA 简介

Pro/MECHANICA 是美国 PTC（Parametric Technology Coporation，参数技术公司）开发的有限元软件。该软件可以实现和 Pro/ENGINEER 的完全无缝集成。

同其他有限元软件相比，Pro/ENGINEER 软件可以完全实现几何建模和有限元分析的集成。绝大部分有限元软件的几何建模功能比较弱，这些有限元软件通常通过 IGES 格式或者 STEP 格式进行数据交换，而这样做最大的弊端在于容易造成数据的丢失，因此常常需要花费大量的时间与精力进行几何模型的修补工作。使用 Pro/MECHANICA 恰好可以克服这一点，该软件可以直接利用 Pro/ENGINEER 的几何模型进行有限元分析。由于 Pro/ENGINEER 具有强大的参数化功能，那么在 Pro/MECHANICA 中就可以利用这种参数化工具的优点，进行模型的灵敏度分析和优化设计，具体地说，当模型的一个或多个参数在一定的范围内变化时，求解出满足一定设计目标（如质量最小、应力最小等）的最佳化几何形。

因此，可以说 Pro/MECHANICA 软件可以真正使工程师们将精力集中在设计工作中，在设计初期就将设计和分析结合起来，从而实现智能设计。使用 Pro/MECHANICA 不需要较深的有限元知识，用户只要略懂材料属性和应力应变基础就可以进行复杂模型的分析工作。

1.1.1 Pro/MECHANICA 模块简介

Pro/MECHANICA 是 PTC 公司强大的有限元软件，其主要模块可以分为以下 3 个部分。

（1）Pro/MECHANICA STRUCTURE：结构分析软件包，可以进行零件模型和装配模型的结构分析和优化分析。它可以完成的分析种类有静态分析、模态分析、曲屈分析、接触分析、预紧分析以及振动分析等。

（2）Pro/MECRANICA THERMAL：温度分析软件包，可以进行零件模型或装配件模型的稳态和瞬态温度分析，也可以根据温度问题进行灵敏度分析和优化设计。

（3）Pro/MECHANICA MOTION：运动分析软件包，进行机构分析和机构运动优化设计，可以进行三维静态分析、运动学分析、动力学分析、逆向动力学分析以及干涉检验分析等。

1.1.2 Pro/MECHANICA 的工作模式

Pro/MECHANICA 有两种工作模式。

（1）集成模式（Integrated Mode）：在 Pro/ENGINEER 环境界面下工作，可以直接利用 Pro/ENGINEER 模型进行网格划分工作，Pro/MECHANICA 分析中所有设计参数的变化都可以直接反映到 Pro/ENGINEER 模型中去。集成模式界面如图 1.1 所示。

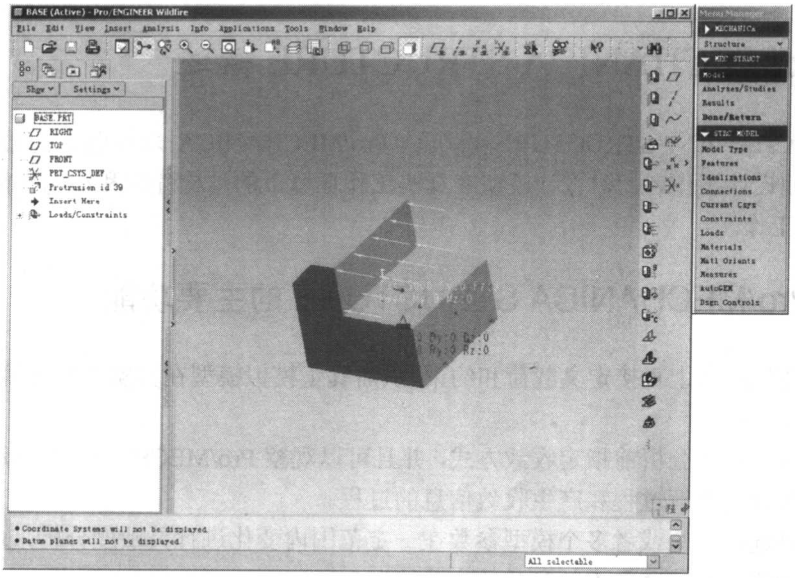


图　1.1

（2）独立模式（Independent Mode）：在 Pro/MECHANICA 界面下工作，有限元模型可以由 Pro/MECHANICA 创建，也可以从其他 CAD 系统中输入几何模型数据。其功能比在集成模式下强。独立模式界面如图 1.2 所示。

用户可以在集成模式和独立模式下进行切换，但切换的顺序只能由集成模式切换到独立模式，不能逆向。

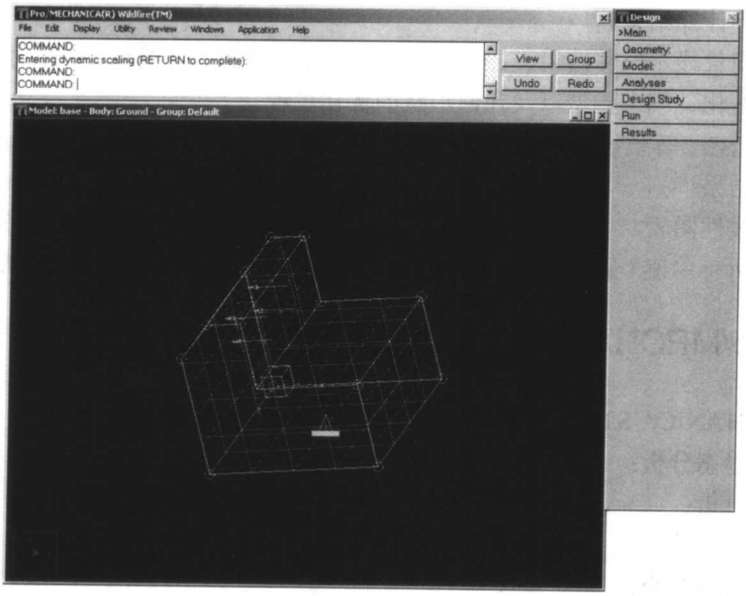


图　1.2

1.2 Pro/MECHANICA STRUCTURE 概述

Pro/MECHANICA STRUCTURE 模块是 Pro/MECHANICA 软件强大的结构分析软件包，它可以使设计工作者们对设计模型在真实工作环境下的结构性能和动态性能进行评估、研究和优化工作。

1.2.1 Pro/MECHANICA STRUCTURE 的主要功能

- ✦ 在几何模型上直接定义载荷和约束，从而真正模拟模型在真实工作环境下的设计性能。
- ✦ 可以在运行分析前指定收敛方式，并且可以观察 Pro/MECHANICA 自动检查错误、收敛方案求解过程和产生收敛信息的过程。
- ✦ 可以选择一个或者多个模型参数在一定范围内变化进行灵敏度分析，以图形的方式显示研究目标随着设计参数的变化情况。
- ✦ 可以对于设计参数在偏离名义值较小时进行局部灵敏度分析，并且可视化显示特定设计参数的改变是否对研究目标有较大的影响。
- ✦ 可以通过指定多个设计参数和一个优化目标进行优化设计分析，这些优化目标包括成本、质量、位移、应力、反作用力、应变、频率或者设计的其他方面等。例如，可以求解在满足应力、一阶自然频率和最大位移在一定限度内时设计目标为装配模型质量最小的优化模型。
- ✦ 可以云图、等值线和查询显示等方式显示和存储选定几何模型元素的位移、应力和应变等计算结果。
- ✦ 可以向量显示位移结果、主应力结果和标准梁截面的计算结果，也可以动画显示位移的变化、模态振型以及几何形状的优化过程。
- ✦ 可以云图、等值线和查询显示等方式保存和反复显示位移、速度、加速度和应力的计算结果。
- ✦ 可以线性图表、半对数图表和对数图表形式显示测量值的每一步的变化值。
- ✦ 获取所有单值（如最小值、最大值、最大绝对值、均方根值）评价方法的概要数值。

1.2.2 Pro/MECHANICA STRUCTURE 的分析类型

Pro/MECHANICA STRUCTURE 可以完成的分析种类有：

- ✦ 线性静态分析；
- ✦ 模态分析；
- ✦ 线性曲屈分析；
- ✦ 预紧静态分析；
- ✦ 预紧模态分析；
- ✦ 非线性接触分析；

- ✦ 非线性大变形分析；
- ✦ 振动分析：强迫振动动态频率分析；
- ✦ 振动分析：强迫振动动态时域分析；
- ✦ 振动分析：强迫振动随机动态分析；
- ✦ 振动分析：强迫振动动态冲击分析。

1.2.3 模型和单元类型

单元类型有：

- ✦ 实体单元：砖形单元、楔形单元和四面体单元；
- ✦ 薄壳单元：四边形单元和三角形单元；
- ✦ 梁单元；
- ✦ 混合单元模型；
- ✦ 质量和弹簧单元；
- ✦ 刚性铰接；
- ✦ 焊接连接：点焊、圆弧焊和端焊；
- ✦ 圆周对称模型；
- ✦ 不同的载荷类型：点的合力、轴承载荷和载荷函数；
- ✦ 从温度分析或运动分析中输入载荷；
- ✦ AutoGEM：自动实体单元、薄壳单元和梁单元网格划分工具；
- ✦ 3 种收敛方式：
  - ✧ 快速检查（Quick Check）；
  - ✧ 单通道适应方式（Single-Pass Adaptive）；
  - ✧ 多通道适应方式（Multi-Pass Adaptive）。

1.3 Pro/MECHANICA 技术基础

Pro/MECHANICA 是基于 P-method 进行工作的，它在进行计算时可以有 3 种收敛方式。本节先介绍这两方面的知识，然后介绍使用 Pro/MECHANICA 进行有限元分析的一般过程。

1.3.1 P-method 与 H-method 的比较

Pro/MECHANICA 采用适应性 P-method 技术，然而传统的有限元软件采用非适应性 H-method 技术。在 P-method 技术中，每个有限元单元的位移方程都是高次多项式（三次以上）；在 H-method 技术中，每个有限元单元的位移方程则是线性方程式，二次方程式或者至多为三次方程式。

非适应性 H-method 技术和适应性 P-method 技术在网格划分时的区别如图 1.3 和图 1.4 所示。很容易看出，非适应性 H-method 技术划出的有限元网格单元较小、数目较多，但是