



CAD/CAE/CAM软件
应用技术与实训丛书



Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 机械结构有限元分析

葛正浩 杨芙莲 编著



化学工业出版社

TH112/44D

2008

CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书

Pro/ENGINEER Wildfire 3.0

机械结构有限元分析

葛正浩 杨芙莲 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍了 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 的 MECHANICA Structure 在结构分析方面的应用, 图文并茂, 引导读者熟练掌握使用结构分析模块进行静力、模态、疲劳、屈曲、灵敏度及优化分析。书中所有实例均配有光盘文件, 非常方便实用。光盘中还包含了主要实例操作过程的演示动画, 供读者在学习过程中选择使用。

本书是以 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 中文版为基础编写的, 为方便使用英文版的用户使用, 所有菜单命令及对话框名称均采用中英文对照的形式表示。书中所用所有专业技术术语均采用本行业的通常用法, 非常适合于工程技术人员与学生使用。

本书可作为机械设计技术人员学习基于 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 进行机械结构有限元分析的入门与实践的书籍, 也可作为大专院校机械类专业学生的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 机械结构有限元分析/葛正浩, 杨芙莲编著.

—北京: 化学工业出版社, 2008.1

(CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书)

ISBN 978-7-122-01940-0

ISBN 978-7-900239-17-4 (盘号)

I. P… II. ①葛… ②杨… III. 机械-结构分析-有限元分析-应用软件, Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 007297 号

策 划: 瞿 微

责任编辑: 孙 炜

装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 332 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 26.00 元 (含 1CD)

版权所有 违者必究

丛 书 序

随着科技的不断进步,制造业正向数字化、全球化、网络化的方向发展,产品的生命周期越来越短,新产品的上市速度越来越快。计算机辅助设计/计算机辅助工程/计算机辅助制造(CAD/CAE/CAM)作为数字化技术的重要组成部分,是计算机技术在工程设计、仿真优化、制造加工等广阔领域中具有重大影响的革新技术。

CAD/CAE/CAM 技术将计算机高速而精确的运算功能,大容量存储和处理数据的能力,丰富而灵活的图形、文字处理功能与设计者的创造性思维能力、综合分析及逻辑判断能力结合起来,形成一个人-机紧密配合的系统。CAD 主要包括数据测量、几何建模、计算分析、绘图及技术文档生成、工程数据库的管理和共享等功能。CAE 是利用计算机科学和技术的成果,建立被仿真系统的模型,并在某些实验条件下对模型进行动态实验的一门综合性技术。CAM 的内容广泛,从狭义上指的是数控程序的编制,包括刀具路径的规划、刀位文件的生成、刀具轨迹仿真以及 NC 代码的生成等。

作为国民经济的基础,各个国家和地区一直很重视制造业的发展,CAD/CAE/CAM 技术与制造业的结合使制造业发生了巨大的变革,也使制造业产生了良好的经济效益。目前,制造企业精良的设备、优良的工作环境、优厚的待遇和高速增长的产值,不仅使其在该行业中所占比重、就业人数、社会贡献位居前列,还为制造业的新技术应用、新产品的开发和生产能力的提高提供了重要的物质基础,是现代化经济不可缺少的战略性产业。

当前,CAD/CAE/CAM 软件技术也在飞速发展,出现了很多软件产品,应用范围比较广的有:Pro/ENGINEER、Unigraphics、SolidWorks、ANSYS、Mastercam、CATIA、Inventor 等,这些产品根据自身的开发档次及其适用度,满足了不同企业的需求。CAD/CAE/CAM 软件的良好应用,需要有一批高素质的具有专业知识并熟练掌握 CAD/CAE/CAM 软件应用的人才。《CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书》可作为大专院校机械类学生掌握 CAD/CAE/CAM 软件的教材,也可作为机械行业从业者掌握或提高 CAD/CAE/CAM 软件应用技术的参考书。

丛书定位

《CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书》以软件实际应用为目标,根据不同读者的需求将丛书分为基础应用篇和实训提高篇。基础应用篇从入门开始,将功能介绍和实例操作相结合,对 CAD/CAE/CAM 软件的使用进行了详尽讲解;实训提高篇以应用实例为主,将软件应用与专业知识相结合,是 CAD/CAE/CAM 软件应用技术的提高和扩展。根据不同的应用功能,本丛书主要可分为以下几大类。

(1) 产品设计:选用典型实例讲解产品结构设计的一般原则和软件应用方法,精解其零件设计→建模→装配→工程图的设计过程。

(2) 模具设计: 讲解使用设计软件进行塑料成型模具设计的一般原则、方法与设计流程。通过典型实例详细说明了应用软件进行塑料成型模具设计的操作和设计过程, 其内容既包括了软件的操作方法与技巧, 又融入了设计的基础知识和要点, 并在实例讲解过程中渗透了设计原则与方法。

(3) 钣金: 将钣金零件及其成形模具设计操作与专业知识相结合, 介绍使用设计软件进行 3D 钣金零件以及冲压成形模具设计的方法和过程。

(4) 数控加工: 以模具零件数控加工的基本知识为基础, 详尽讲解软件数控加工的基本操作方法, 在重点讲解操作应用的同时, 大量渗透模具设计、加工、使用及材料等方面的专业知识, 作为选择数控加工参数的依据。

(5) 机构设计与运动仿真: 以机构设计和运动分析的专业知识为基础, 将传统设计与计算机技术相结合, 精讲了常用机构计算机辅助设计的思路和方法, 以及机构运动仿真模块的分析和应用方法。

(6) 曲面设计与逆向工程: 讲解曲面造型命令的使用和典型曲面造型实例的操作过程, 并结合逆向工程技术, 精讲曲面数据测量和曲面重构的方法。

(7) 有限元分析: 包括机械结构分析、热分析、流体分析、模流分析、材料成形过程分析等内容, 精讲了有限元分析模型建立→条件设置→分析的过程, 并通过典型模型的实例讲解, 详细介绍有限元分析的思想和方法。

读者对象

《CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书》特色鲜明, 读者面广。

基础应用篇从入门开始、由简入繁、循序渐进, 适用于想从事机械行业并掌握一技之长的初学者, 尤其适用于想全面、扎实学习 CAD/CAE/CAM 软件应用的机械类学生和从业者, 也可作为 CAD/CAE/CAM 等相关课程的教材或参考书。

实训提高篇内容全面、实用性强, 可供从事机械设计与制造、机构设计、产品设计、模具、钣金、数控等专业工程技术人员以及 CAD/CAE/CAM 研究与应用人员参考, 尤其适用于具有一定基础的中级用户提高和学习使用, 也可作为 CAD/CAE/CAM 软件相关培训内容的教材或参考书。

结构安排

(1) 软件的各主要功能在讲解的基础上结合实例操作, 使读者在学习时能结合练习快速掌握要点。

(2) 每本书都含有配套光盘, 包括了练习文件、结果文件和演示动画, 保证了读者的自学能顺利完成, 通过与结果文件对比, 检查自己操作的正确性。

(3) 对于基础应用篇, 从软件安装开始, 对 CAD/CAE/CAM 软件的界面布局、命令介绍、模块功能、简单实例操作等进行了详细的讲解, 读者通过系统学习, 不仅能快速入门, 还能较扎实地掌握软件应用基本功。

(4) 对于实训提高篇, 实例选用典型、全面, 借助于典型的较复杂实例讲解, 使读者

掌握多种设计的方法和技巧，并将软件应用与专业知识相结合，使具体设计有章可循。

近期出版的图书

《CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书》选择目前广泛运行于计算机平台之上的主流 CAD/CAE/CAM 软件，如 Pro/ENGINEER、SolidWorks、UG 等，分批出版相应图书，详细介绍其使用方法与技巧。

《CAD/CAE/CAM 软件应用技术与实训丛书》由葛正浩主编。

葛正浩

2007 年 8 月

前 言

Pro/ENGINEER 是 PTC 公司基于单一数据库、参数化、特征、全相关及工程数据再利用等概念基础上开发出的一个功能强大的 CAD/CAE/CAM 软件,它可将产品从设计到生产加工的过程集成在一起,让所有用户同时进行同一产品的设计与制造工作。

Pro/MECHANICA 需要单独安装,它包括 Structure (结构分析) 模块和 Thermal (热力学分析) 模块,其中 Structure (结构分析) 模块主要解决模型结构方面的问题, Thermal (热力学分析) 模块主要计算与热传递有关的问题。Pro/MECHANICA 可以完全实现几何建模和有限元分析的无缝集成,用户在 Pro/ENGINEER 环境下完成零件的几何建模后,无需退出设计环境就能进行有限元分析。

Pro/MECHANICA Structure 是集静态、动态结构分析于一体的有限元模块,能够模拟真实环境为模型施加约束及载荷,测算模型的应力、应变、位移等参数,实现静态、模态、翘曲、疲劳、动态响应、振动等分析;通过指定设计参数,能够在给出变化范围内进行敏感度分析,并借助优化分析为模型寻找到最佳参数。在设计阶段就对设计模型进行优化,及时发现错误,提高产品设计质量,降低设计成本。

本书介绍了基于 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 的 MECHANICA Structure 在结构分析方面的应用,图文并茂,引导读者熟练掌握使用结构分析模块进行静力、模态、疲劳、屈曲、灵敏度及优化分析。书中所有实例均配有光盘文件,非常方便实用。

书中所有实例均为常见的模型,所附光盘包含了全部实例所需的文件。每一个实例的所需文件,均放在相应实例名的文件夹中。该实例最后完成的结果,放在相应实例名文件夹的“结果”文件夹中,备练习后对照检查。为方便使用,建议读者先将所有文件复制到计算机的硬盘中。光盘中还包含了实例操作过程的演示动画,供读者在学习过程中选择使用。其中第 10 章的演示动画,由于分析过程所占用的时间较长,因此将动画分成分析前和分析后结果查看两部分。

本书是以 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 中文版为基础编写的,为方便使用英文版的用户使用,主要菜单命令及对话框名称采用了中英文对照的形式表示。书中所用专业技术术语均采用本行业的通常用法,非常适合工程技术人员与学生使用。本书可作为机械设计技术人员学习基于 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 进行机械结构有限元分析的入门与实践的书籍,也可作为大专院校机械类专业学生的教材或教学参考书。

本书第 1~4 章由杨芙莲编写,第 5~10 章由葛正浩编写。

参加编写的还有贾娟娟、朱晔、韩小伟、唐小云、梁江波、厉成龙、丁英杰、李竞洋、王金水、苏鹏刚等。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2007 年 8 月

目 录

第 1 章	Pro/MECHANICA Structure 简介	1
1.1	Pro/MECHANICA 及其工作模式简介	2
1.1.1	集成模式 (Integrated mode)	2
1.1.2	独立模式 (Independent Mode)	3
1.1.3	集成模式与独立模式的比较	4
1.2	Pro/MECHANICA 的安装	4
1.3	Pro/MECHANICA Structure 简介	6
1.3.1	Pro/MECHANICA Structure 的主要功能	6
1.3.2	Pro/MECHANICA Structure 的分析类型	7
第 2 章	Pro/MECHANICA Structure 基础	9
2.1	Pro/MECHANICA Structure 分析的基本工作流程	10
2.2	Pro/MECHANICA Structure 的用户界面简介	12
2.2.1	进入 Pro/MECHANICA Structure 模式	12
2.2.2	菜单栏简介	13
2.2.3	常用工具栏介绍	27
第 3 章	有限元分析模型的建立	31
3.1	模型类型	32
3.1.1	三维模型	32
3.1.2	平面应力模型	32
3.1.3	平面应变模型	32
3.1.4	二维轴对称模型	33
3.2	模型的理想化	33
3.2.1	壳 (Shell)	33
3.2.2	梁 (Beam)	36
3.2.3	弹簧 (Spring)	39



3.2.4 质量 (Mass)	40
3.3 连接的创建	42
3.3.1 “连接”菜单简介	42
3.3.2 创建焊接连接实例	44
3.3.3 创建刚性连接实例	48
3.4 当前坐标系	50
3.5 分析基准特征的创建	50
3.6 有限元分析中材料的分配设置	53
3.6.1 特性参数	53
3.6.2 添加材料	54
3.6.3 制作材料库	55
3.7 单元网格的划分	56
3.7.1 自带模式下的网格划分	56
3.7.2 FEM 模式下的网格划分	58

第 4 章 约束和负荷的设置

63

4.1 有限元分析中的负荷类型	64
4.1.1 点负荷	64
4.1.2 线负荷	68
4.1.3 面负荷	70
4.1.4 压力负荷	72
4.1.5 轴承负荷	72
4.1.6 离心负荷	73
4.1.7 重力负荷	74
4.1.8 温度负荷	74
4.2 有限元分析中的约束类型	75
4.2.1 点约束	75
4.2.2 线约束	76
4.2.3 面约束	77
4.2.4 对称约束	78

第 5 章 有限元分析应用基础实例

81

5.1 梁和刚架	82
5.1.1 梁坐标系	82



5.1.2	悬臂梁	82
5.1.3	分布载荷作用下的U形梁	90
5.1.4	二维刚架	95
5.2	平面问题分析	99
5.2.1	平面应力模型	99
5.2.2	平面应变模型	104
5.3	实体模型	109
5.4	薄壳模型	112
5.4.1	人工创建薄壳模型	112
5.4.2	实体-薄壳模型	118

第6章 静力分析

6.1	直齿圆柱齿轮受力分析	124
6.2	组件静压力分析	134

第7章 模态分析

7.1	中空梁的固有频率分析	140
7.2	简支梁的频率分析	147

第8章 疲劳分析

8.1	Fatigue Advisor 简介	154
8.2	材料的疲劳特性	154
8.3	疲劳载荷	156
8.4	连接环疲劳分析	158

第9章 屈曲分析

9.1	细长杆屈曲分析	168
9.2	薄板屈曲分析	173

**第 10 章 动态响应分析**.....179

10.1 动态时域分析.....180

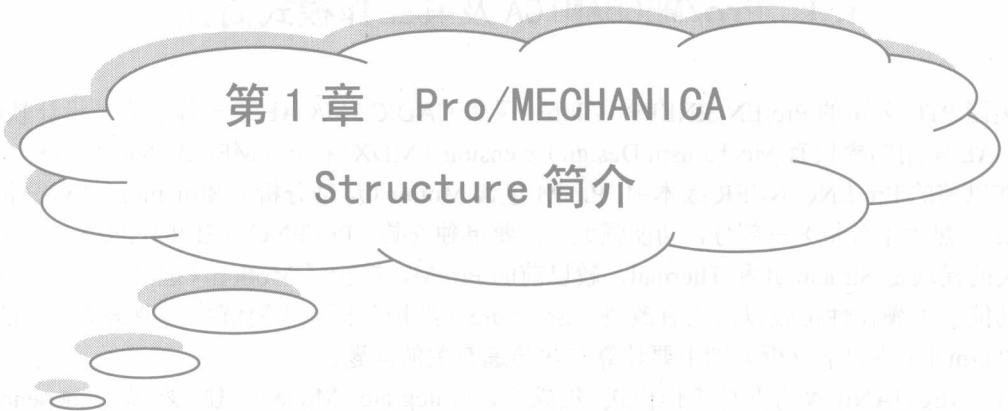
10.2 动态频域分析.....191

第 11 章 优化设计.....201

11.1 灵敏度分析.....202

11.2 优化分析.....210

参考文献.....213



第1章 Pro/MECHANICA Structure 简介

【内容】

本章主要介绍 Pro/MECHANICA 的两种工作模式，即集成模式和独立模式，以及两者之间的区别，进而详细介绍 Pro/MECHANICA 的安装过程，最后简单介绍 Pro/MECHANICA Structure 的主要功能及分析类型。

【目的】

通过本章的学习，使读者对 Pro/MECHANICA Structure 有一个初步认识，以方便对本书后继内容的学习与掌握。



1.1 Pro/MECHANICA 及其工作模式简介

美国 PTC 公司的 Pro/ENGINEER Wildfire 是集 CAD/CAM/CAE 于一体的大型设计软件，其中 CAE 常用的模块有 Mechanism Design Extension (MDX) 和 Pro/MECHANICA (Pro/M)。

在以前的 Pro/ENGINEER 版本中，Pro/M 包含 Motion (运动分析)、Structure (结构分析)、Thermal (热力学分析) 三部分，功能强大，需要单独安装。Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 中单独安装的模块是 Structural 和 Thermal，较以前的 Pro/M，缺少了 Motion (运动分析) 模块。但是功能及可操作性都较以前大有改进。Structure (结构分析) 主要解决模型结构方面的问题，Thermal (热力学分析) 则主要计算与热传递有关的问题。

Pro/MECHANICA 有两种工作模式，集成模式 (Integrated Mode) 和独立模式 (Independent Mode)。前者是在 Pro/ENGINEER 的操作界面下进行的，后者是在单独的 MECHANICA 界面下进行的。

本书主要讲述 Structure (结构分析) 模块在工程结构方面的分析应用，为方便起见，实例主要采用集成模式来完成。

1.1.1 集成模式 (Integrated mode)

在 Pro/ENGINEER 环境下集成了 Pro/MECHANICA 的仿真功能。在不脱离 Pro/ENGINEER 用户环境下可以创建模型、分析模型并优化模型。不过此模式下又包含两种模式，即软件自带模式 (Native Mode) 和 FEM (Finite Element Mode) 模式。

1. 软件自带模式 (Native Mode)



图 1-1 “模型类型”对话框

单击菜单栏中的【应用程序 (Applications)】→【Mechanica】命令，在弹出的“Unit Info”对话框中单击【继续】按钮，弹出如图 1-1 所示的“模型类型 (Model Type)”对话框，不勾选“有限元模式”复选框，直接单击【确定】按钮，或是单击【Advanced】按钮。进行分析类型的设置后再单击【确定】按钮，即可进入自带模式的操作界面。

此种模式运行于 Pro/ENGINEER 平台之中，操作及界面与 Pro/ENGINEER 相同，能够直接使用建模参数进行分析及结构优化。

2. FEM 模式 (Finite Element Mode)

若在如图 1-1 所示的“模型类型”对话框中勾选“有限元模式”复选框，就可以用 FEM 模式去解决结构分析问题了。

需要指出的是，此种模式没有求解器，需要借助第三方软件求解，但是在 Pro/ENGINEER



中可以完成材料的设置、模型的理想化、约束及载荷的设置、模型网格的划分。

在未安装 Pro/MECHANICA 的环境下，FEM 模式同样可用。

3. 集成工作模式的特点

(1) 可以选择在 Mechanica 或 FEM 模式下定义模型。Mechanica 模式使用 P 方法划分单元网格；FEM 模式允许使用第三方提供的 H 方法求解器来分析模型。

(2) Pro/MECHANICA 可以在模型分析中自动划分网格。对于实体模型，Pro/MECHANICA 使用四面体、楔、砖块等实体单元网格；对于薄壳类模型，使用三角形和四边形联合划分网格。也可以创建混合型单元网格。

可以手动添加若干专门的单元类型，或者对模型进行理想化和创建连接，包括梁、各种类型的焊接、弹簧、接触、刚性连接和块。

分析进行之前可以对划分的网格进行检测和进一步完善。

(3) 在灵敏度分析和优化设计中，可以通过在模型中定义变量优化模型尺寸。

(4) 可以同时多个模型下工作。包括同时打开装配模型及此装配模型中的任何零件，零件的改变会自动保存到装配模型中去，运行分析的同时会自动保存模型。

1.1.2 独立模式 (Independent Mode)

Pro/MECHANICA 作为一个独立的软件运行，进行建模、分析及设计优化，与 Pro/ENGINEER 没有关联。独立模式的操作界面如图 1-2 所示。在此种模式下，可以在 Pro/ENGINEER 中进行几何建模然后导入 Pro/MECHANICA，也可以导入其他 Pro/MECHANICA 支持的 CAD 软件创建的模型，或者直接在 Pro/MECHANICA 中创建模型。只是需要注意，优化设计模型的参数后，模型只在 Pro/MECHANICA 中改变，而不能自动在 Pro/ENGINEER 中更新。

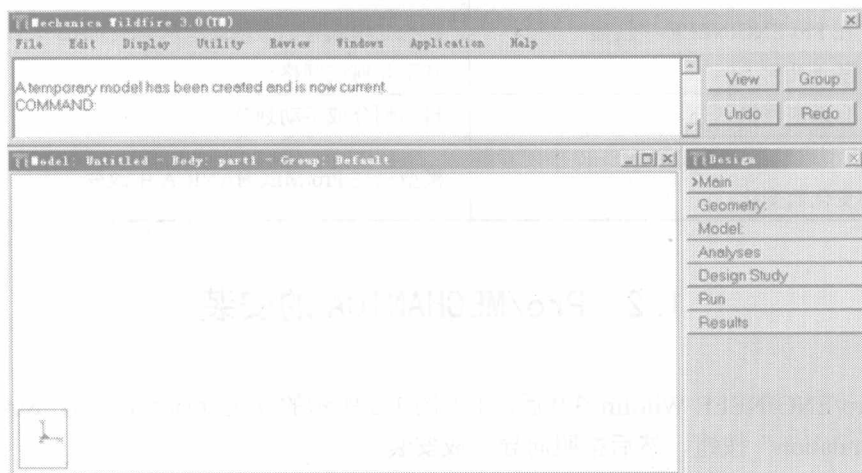


图 1-2 独立模式操作界面



独立工作模式有以下特点：

(1) 可以选择手动或者自动方式划分网格单元。对于实体模型，可以创建诸如砖块、楔、四面体那样的网格；对于壳体模型，可以创建三角形、四边形的壳或平板单元。甚至可以手动加入一些特殊形状的网格。

(2) Pro/MECHANICA 提供了一系列人工网格生成方法，如几何选取、播种种子点、挤出和旋转等。如果想自动生成网格，可以使用 Pro/MECHANICA 提供的 AutoGEM 软件。

(3) 在灵敏度分析和优化设计中，可以通过定义尺寸设计变量和特性设计参数来指定模型中可以改变的参数。

(4) 以创建基于单元的测度，获取使模型发生裂纹的力和力矩。

(5) 可以将 Pro/MECHANICA 分析产生的运动方程导出到其他模拟环境。

(6) 此种模式的操作性欠佳。

1.1.3 集成模式与独立模式的比较

两种模式在结构分析中的区别见表 1-1。

表 1-1 集成模式与独立模式在结构分析中的区别

	集成模式 (Integrated mode)	独立模式 (Independent Mode)
分析类型	所有	所有
求解器	P-code native solvers Third-part H-code solvers	P-code native solvers
模型类型	二维和三维	二维和三维
图形格式	仅在 Pro/ENGINEER 界面下创建的	在 Pro/MECHANICA 中创建的，也可以是独立模式兼容的其他 CAD 图形格式
模型实体	在 Pro/ENGINEER 中创建	在独立模式界面下创建或从其他 CAD 软件导入
测量	基于几何	基于几何或网格单元
网格划分	自适应网格划分	自动划分或手动划分
参数, 变量	模型可以在 Pro/ENGINEER 中随参数的变化而变化	模型只在 Pro/MECHANICA 中改变

1.2 Pro/MECHANICA 的安装

安装 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 后，在如图 1-3 所示的安装界面中，单击“Structural and Thermal Simulation”按钮，然后按照向导完成安装。

安装完 Structural and Thermal Simulation 模块后，并不能直接使用集成模式，需要对 Pro/ENGINEER 的启动命令进行相关的配置。

(1) 在安装 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 的根目录下，找到“bin”文件夹，运行此文件



夹中的批处理文件“ptcsetup.bat”，进行 Pro/ENGINEER 的超级安装（安装过程同第一次安装，但不再复制文件）。

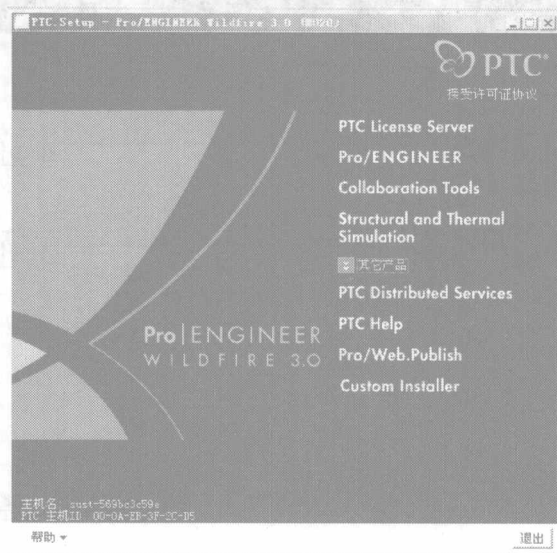


图 1-3 安装界面 1

(2) 当向导切换到如图 1-4 所示的“选择要执行的可选配置步骤”界面时，勾选“配置其他产品的互用性”复选框，单击【下一个】按钮，弹出如图 1-5 所示的对话框。在“定位其他安装位置”文本框中输入 Structural and Thermal Simulation 的安装路径。单击【配置】按钮，完成安装。此时，Structural and Thermal Simulation 模块就内嵌到 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 的集成环境中了。

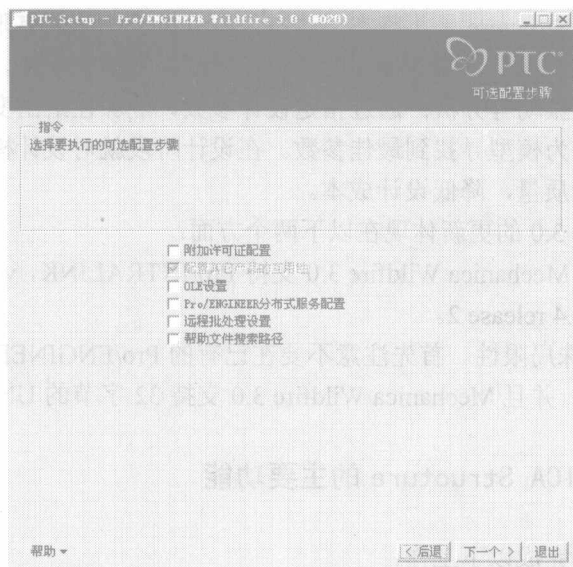


图 1-4 安装界面 2

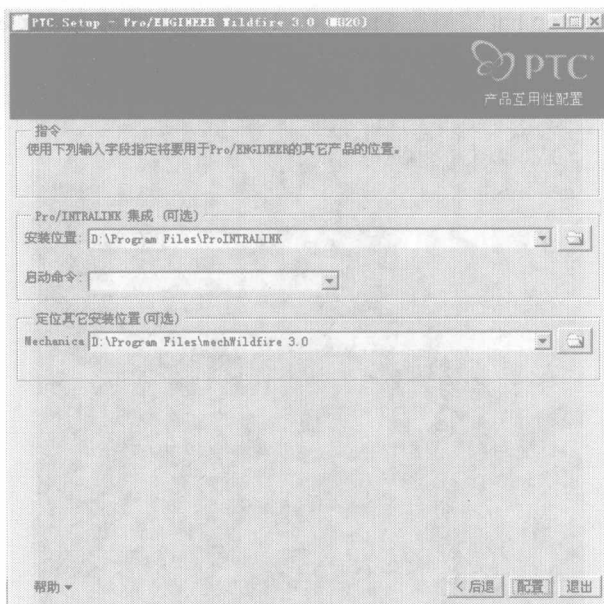


图 1-5 安装界面 3

(3) 单击菜单栏中的【应用程序 (Applications)】→【Mechanica】命令，就可以启动 Structural and Thermal Simulation 模块。

1.3 Pro/MECHANICA Structure 简介

Pro/MECHANICA Structure 是集静态、动态结构分析于一体的有限元模块，能够模拟真实环境为模型施加约束及载荷，测算模型的应力、应变、位移等参数，实现静态、模态、翘曲、疲劳、动态响应、振动等分析；通过指定设计参数，能够在给出变化范围内进行敏感度分析，并借助优化分析为模型寻找到最佳参数。在设计阶段就对设计模型进行优化，及时发现错误，提高产品设计质量，降低设计成本。

Mechanica Wildfire 3.0 的更新体现在以下两个方面：

(1) 兼容性问题。Mechanica Wildfire 3.0 支持 Pro/INTRALINK, version 3.4, Unigraphics NX 2.0 以及 CATIA 4.2.4 release 2。

(2) 操作平台特殊局限性。首先注意不要在已有的 Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 下安装 Mechanica Wildfire 3.0。并且 Mechanica Wildfire 3.0 支持 32 字节的 UNIX 操作系统。

1.3.1 Pro/MECHANICA Structure 的主要功能

结构分析模块能够完成以下工作：

(1) 在几何模型上定义载荷、约束和材料特性，从而为设计模型建立一个真实的工作