

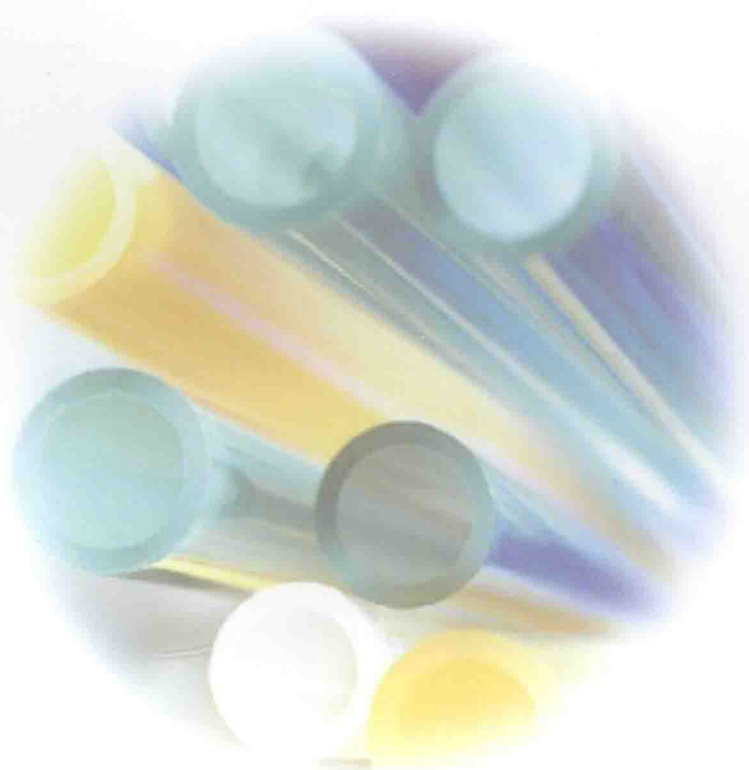
中国波兰双边政府间科技合作计划第35届例会项目 (2012-35-05)
江苏省教育科学“十二五”规划2013立项项目 (D/2013/01/130)
国家自然科学基金面上项目 (51176015)
江苏省2013年度政府留学奖学金 (JS-2013-326)

联合资助

接触互动问题有限元建模

—— ADINA工程应用实例

朱庆杰 何岩峰 著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

中国波兰双边政府间科技合作计划第 35 届例会项目 (2012-35-05)

江苏省教育科学“十二五”规划 2013 立项项目 (D/2013/01/130)

国家自然科学基金面上项目 (51176015)

江苏省 2013 年度政府留学奖学金 (JS-2013-326)

联合资助

接触互动问题有限元建模 ——ADINA 工程应用实例

朱庆杰 何岩峰 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

接触互动问题有限元建模: ADINA 工程应用实例/朱庆杰, 何岩峰著. —北京: 中国科学技术出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 5046 - 6806 - 6

I. ①接… II. ①朱… ②何… III. ①有限元分析 - 应用软件 IV. ①O241. 82 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 004544 号

出版人 苏 青
责任编辑 付万成 郭秋霞
封面设计 小 夏
责任校对 韩 玲
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62173865
传 真 010 - 62179148
投稿电话 010 - 62176522
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm × 1092mm 1/16
字 数 300 千字
印 张 15
版 次 2015 年 1 月第 1 版
印 次 2015 年 1 月第 1 次印刷
印 刷 北京长宁印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6806 - 6/TU · 95
定 价 48.00 元

内容提要

本书针对工程中较为常见的地下结构与土体相互作用、流固耦合、多孔介质流固耦合、热力耦合与热流固耦合等接触互动问题,介绍了 ADINA 软件的有限元建模方法,摩擦接触和流固耦合计算方法。结合跨断层埋地输液管道破坏、油气开发中地层变形分析、建筑场地变形与桩基—土体互动分析、煤矿突水事故模拟、地层—套管—水泥环系统变形破坏、埋地热力管道破坏、注蒸汽热采井套管破坏等工程问题,阐述了应用 ADINA 软件的有限元分析过程。书中采用针对具体实例以实际软件操作为主的阐述方法,结合近年来多项课题的研究成果,以 ADINA 软件的工程应用开发为核心,以便于所阐述技术方法的工程应用。

该书可以作为石油天然气工程、防灾减灾工程、市政工程等专业研究生相关课程的教学参考书,并可供从事有限元分析方面的科技人员参考。

前 言

本书内容系作者多年来在石油天然气工程与防灾减灾工程领域所主持的多个课题研究成果的总结、提炼和系统化。先后得到的资助项目包括：国家自然科学基金面上项目：地下管道破坏的关键参数与多准则评价方法（50678059）、河北省科技支撑计划项目：矿区地层蠕变与成灾模式的液固互动分析技术（09277130D）、国家科技支撑计划子课题：城市抗震防灾标准的研究（2009BAJ28B04-02B）、河北省自然科学基金项目：流固耦合作用下地层蠕变与套管破坏的有限元分析（D2010000922）、常州大学科技项目：多场耦合作用下油井套管损坏的有限元分析（ZMF1102071）、科技部国际合作司中国波兰双边政府间科技合作计划：中国波兰科技合作委员会第35届例会项目（2012-35-5）、江苏省教育科学“十二五”规划项目：应用型人才创新实验平台的国际合作模式与实践（D/2013/01/130）以及江苏省2013年政府留学奖学金（JS-2013-326），王树立教授主持的国家自然科学基金面上项目（51176015）：管道螺旋流动天然气水合物生成促进理论研究等。本书内容来源于以上项目的研究成果。

书中主要围绕工程中常见接触互动问题的有限元建模方法，采用针对具体实现过程以实际软件操作为主的写作方法，以ADINA软件的开发应用为核心，介绍了地下结构与土体相互作用、流固耦合、多孔介质流固耦合、热力耦合与热流固耦合等接触互动问题的有限元建模方法与分析过程，以及摩擦接触与流固耦合等计算方法。全书共分七章，第一章介绍了有限元建模过程与ADINA软件的NATIVE与PARASOLID建模方法，是建模基础知识部分。第二章是接触问题分析的重要部分，包括摩擦接触的设置与接触计算方法，埋地直管与埋地弯管接头建模方法，桩土相互作用分析建模方法、地层—套管—水泥环系统建模方法等。写作顺序基本上按照实际建模步骤来写，以使读者能够依据此方法建立实际的计算模型。第三章针对管道内外壁界面的互动问题分析与内壁流固耦合作用，介绍了跨断层埋地输液管道建模与非稳态流体问题。在详细介绍建模过程的基础上，依据计算结果分析了各种因素对埋地管道破坏的影响。第四章是本书的重点内容之一，通过分析多孔介质流固耦合

问题,介绍了多孔介质流固耦合作用下的有限元建模与分析过程,包括固体模型和流体模型的建立、多孔介质域划分、流固耦合的求解和结果分析。并应用于石油开发中的储层变形分析、煤矿突水事故模拟与建筑场地变形分析等。第五章和第六章介绍了热力耦合和热流固耦合的有限元建模方法,包括埋地热力管道热力耦合、注蒸汽热采井热力耦合、注蒸汽热采油藏热流固耦合等。通过建立实例模型,分析了计算结果。第七章介绍了接触互动作用下套管破坏过程与裂纹扩展计算的有限元方法,包括裂纹扩展理论、套管破坏特点与裂纹扩展的有限元计算,初步探讨了套管损坏机理。

可以说,本书是全体课题组成员多年来的共同研究成果,凝聚了课题组全体员工的辛勤劳动,在这里对参加课题研究工作的各位项目组成员以及参与课题的研究生们深表感谢。值得一提的是,本书仅是该领域研究中的很小一方面,即便如此,由于著者水平和精力有限,错误和不妥之处在所难免,望各位专家和广大读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月

目 录

前 言

第一章 ADINA 软件建模方法简介	1
第一节 ADINA 软件简介	1
第二节 ADINA 软件界面与建模过程	4
第三节 NATIVE 与 PARASOLID 建模方法	9
第二章 块体与刚体接触建模	17
第一节 接触计算	17
第二节 摩擦接触的设定	23
第三节 埋地直管建模	26
第四节 埋地弯管接头建模	43
第五节 桩土相互作用	48
第六节 地层 - 套管 - 水泥环系统建模	52
第三章 流固耦合分析建模	61
第一节 管道内外壁界面问题分析	61
第二节 跨断层埋地输液管道建模	65
第三节 非稳态流体问题	74
第四章 多孔介质流固耦合分析建模	76
第一节 多孔介质流固耦合问题	76
第二节 储层变形分析建模过程	79
第三节 开发注水对地层变形的影响	85

第四节	煤矿突水事故模拟	90
第五节	建筑场地变形模拟	115
第五章	热力耦合分析建模	127
第一节	热力耦合问题分析	127
第二节	埋地热力管道建模	131
第三节	注蒸汽热采井建模	143
第四节	注蒸汽热采的影响分析	148
第六章	热流固耦合问题	157
第一节	热流固耦合概述	157
第二节	建模过程	160
第三节	辽河油田应用实例	170
第七章	互动作用下套管破坏与裂纹扩展过程	174
第一节	裂纹扩展理论	174
第二节	套管破坏特点分析	180
第三节	建模过程与计算结果	186
第四节	套管损坏的影响因素与破坏机理	193
参考文献		205

第一章 ADINA 软件建模方法简介

第一节 ADINA 软件简介

ADINA 是 Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis 的首字母缩写, 为动力非线性有限元分析软件。ADINA 具备分析非线性问题的强大功能, 包括求解结构以及多场耦合问题。ADINA 软件由 K. J. Bathe 博士带领的研究小组于 1975 年开发完成, 1986 年开始商业化, 现已推出 8.9 版本。ADINA 的 User Interface (简称 AUI) 界面可实现所有建模和后处理功能, 共分为六个部分, 分别是菜单区、图形区、图标区、命令输入窗口、输出信息窗口和模块选择窗口。菜单区包括输入输出文件、几何建模、单元划分、加载、求解控制等功能。图形区用于显示所建模型, 并可以由用户控制显示颜色和方式。图标区包括常用命令的快捷键, 用户也可以自定义图标。命令输入窗口可通过输入 ADINA 命令启动其某一功能。输出信息窗口显示程序对当前操作的响应, 或程序对下一步操作的提示信息。命令流文件 Jobname.in 自动记录跟踪用户输入数据和所选的选项, 用户可以随意查看、编辑 Jobname.in 文件, 达到重建或修改整个模型的目的。

ADINA - AUI 可通过 Native 和 Parasolid 方式创建各种几何模型, 并提供各种时间函数和空间函数, 空间函数能够实现各种非均布载荷的加载。ADINA 提供多种网格划分器, 同时也具有自适应网格重划分功能。后处理功能支持各种结果变量可视化处理方法, 如网格变形图、彩色云图、等值线图、矢量图等; 可简便实现旋转、平移、缩放、抓图和生成动画等操作; 方便地生成计算结果的动画显示、切片动画、动画播放, 同时可以进行旋转、缩放、平移等操作; 可从输出变量中定义导出变量; ADINA 模型可以进行隐藏、透明显示并方便的绘制出模型的任意点任一计算结果参量随时间或其他参量的变化曲线等。ADINA 还具有以下多个易于使用的特点:

(1) 完全交互式的图形界面，具有下拉菜单和对话框，可选取选项和输入数值；

(2) 快捷图标可进入常用的任务；

(3) 制图窗口具有复制和粘贴特点；

(4) 程序内可直接创建 AVI 视频；

(5) 图形可以矢量和位图形式输出；

(6) 具有撤销和重做特点，撤销的数量可由用户定制；

(7) 模型可进行动态旋转、缩放和快速平移；

(8) 对于经常重复的任务支持命令文件输入。

在后处理过程中，包括大量的可视化工具：

(1) 变形和原始的网格图；

(2) 带状图和轮廓图；

(3) 矢量图和张量图；

(4) 在图表上标示变量；

(5) 在屏幕上或者以文件形式详细罗列变量值；

(6) 对输出变量产生的合成变量进行解释。

ADINA 系统由以下模块组成：

一、ADINA - AUI

ADINA 用户界面程序为所有 ADINA 子程序提供了完整的预处理和后处理功能，它为建模和后处理的所有任务提供了一个完全交互式的图形用户界面。ADINA 程序为固体、桁架、梁、管道、金属板、壳体和缝隙提供了多样化和通用的有限元，材料模型有金属、土壤与岩石、塑料、橡胶、织物、木材、陶瓷和混凝土可选。ADINA 程序具有以下分析功能：

(1) 有效的线性分析；

(2) 小型和大型的变形、大型应变；

(3) 弹塑性、蠕变 (Creep) 分析，包括热效果；

(4) 屈曲和后屈曲 (Post - buckling) 分析；

(5) 静力学和动力学中的接触问题；

(6) 大型系统的迭代算法；

(7) 用于所有分析的高效却稀少的算法；

- (8) 静力学和动力学的子结构分析;
- (9) 分析过程中可增减单元;
- (10) 频率和模式的叠加;
- (11) 感应波谱、随机震动分析;
- (12) 线性化的屈曲分析;
- (13) 波的传播、冲击波分析;
- (14) 结构震动、谐波分析;
- (15) 声学的流体 - 结构间相互作用;
- (16) 带裂纹传播的断裂力学;
- (17) 用户提供的单元、模型和载荷。

二、ADINA - M

ADINA - M 是 ADINA - AUI 程序的一个附件, 提供了三维建模的功能, 通过 ADINA - M 可在 ADINA - AUI 程序中直接创建立体的几何图形。ADINA - M 基于 Parasolid 核心, 先进的 Parasolid 几何建模技术提供的实体建模器可以方便地建立各种复杂的实体结构, 同时对所有基于 Parasolid 的 CAD 系统的模型实现无缝链接; 并提供多种收敛准则和丰富的材料模型, 用户可以提供自定义的破坏准则; 提供的固液耦合求解器, 可为各种流固耦合问题的解决提供支持。尤其重要的是 ADINA 提供多种摩擦模型, 供用户进行自定义并使用, 可定义摩擦系数随任意接触状态参数如接触压力、相对滑动速度, 甚至温度的变化规律。

三、ADINA - F

ADINA - F 程序为可压缩和不可压缩的流体提供了世界一流的有限元和控制流量的解决能力, 流体可包含自由表面和流体间以及流体与结构间的流动界面。程序运用一个任意拉格朗日欧拉 (ALE) 公式。ADINA - F 中使用的程序基于有限元和有限体积离散图, 带有非常全面和高效的解决方法, 可解决任意几何学中的全部流动问题。

四、ADINA - T

ADINA - T 用来解决固体和结构中的热传递问题。它分析功能强大, 比如, 任意几何图形表面间的辐射、单元生死选项和高度非线性材料特性等功能。可分析以下问题:

- (1) 2-D 和 3-D 传导、对流和辐射;
- (2) 立体和壳体结构;
- (3) 稳态和瞬变条件;
- (4) 任意表面间的辐射;
- (5) 单元生死选项;
- (6) 随时间和温度变化的材料特性;
- (7) 自动时间步进;
- (8) 静电、渗流和压电分析;
- (9) 潜热效应, 如凝固和融化条件;
- (10) 与 ADINA 连接。

五、ADINA - FSI

ADINA - FSI 程序是用于带有结构相互作用的流体流动完全耦合分析 (多物理场) 的主要工具。它把 ADINA 与 ADINA - F 的所有功能全部整合成一个程序模块, 结构和流体流动可使用截然不同的网格。

六、ADINA - TMC

ADINA - TMC 程序可用于解决如下类型的问题:

- (1) 完全耦合的热机械分析;
- (2) 压电分析 (带用户定义子程序);
- (3) 土壤固结分析 (推荐使用 ADINA 程序中的多孔介质方程来解决这类型的问题)。

第二节 ADINA 软件界面与建模过程

一、ADINA 用户界面程序的启动

ADINA - AUI 的启动有三种方式:

- (1) 从系统的开始——程序菜单启动 (如图 1-1)。
- (2) 点击自动生成的 AUI 图标启动——双击桌面上 ADINA 安装时自动生成的



图 1-1 ADINA - AUI 启动

AUI 图标。

(3) 用命令行方式启动 ADINA 的任何模块。

ADINA 系统安装在 C 盘 Program Files 目录下, 在 Windows XP 系统的启动命令行如图 1-2 所示。

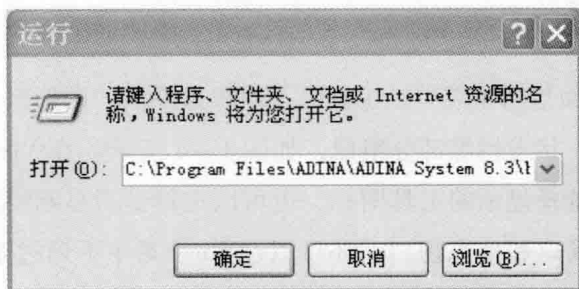


图 1-2 ADINA - AUI 的命令行启动

可在命令行上启动 AUI 或任何求解器。如: 启动 CFD 求解器 ADINA - F 执行计算任务:

```
/usr/local/ADINA/tools/adianf -b -m 120MB -M 400MB -t 2 tunnel
```

其中, -m 指定基本内存数量, -M 指定方程求解器内存数量, -t 指定启动的 CPU 个数, tunnel (.dat) 是对应于求解器的数据文件。

现在一般采用第一或者第二种启动方式, 设置自动为缺省设置, 可通过改变环境设置参数来改变系统设置。

二、ADINA 的有限元分析流程

应用 ADINA 对管道跨断层模型进行计算分析主要由三部分组成: 建立模型, 加载求解, 计算结果分析。具体流程如图 1-3 所示:

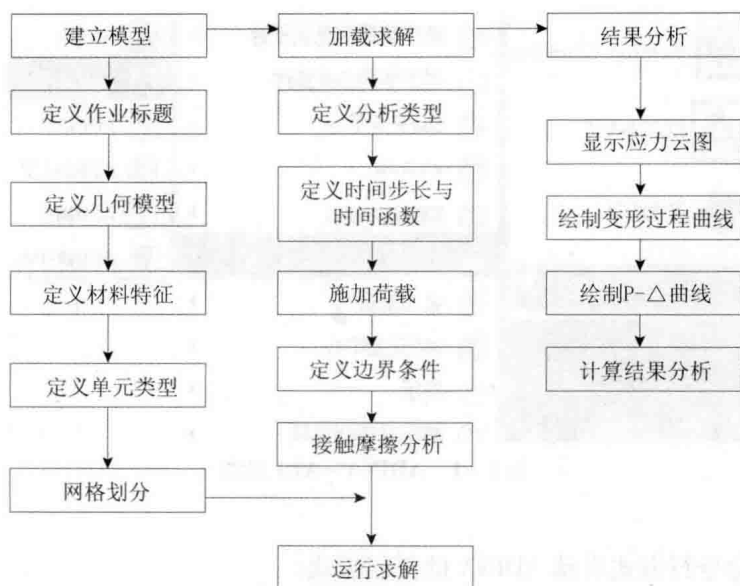


图 1-3 有限元分析流程

三、用户界面

ADINA 用户界面包括主菜单、工具栏、模块选择区、图形区、模型树、命令输入窗口、信息窗口、状态栏等部分组成，如图 1-4 所示。在 View 菜单下可以改变用户界面设置，可选择显示的工具图标，也可以选择是否显示模块栏、状态栏、模型树以及命令输入窗口和信息窗口。还可以在 View 菜单下通过定制工具（Customize）定制要显示的工具与指令图标和快捷键。

各部分简要介绍如下：

1. ADINA 主菜单

- (1) 主菜单包括 ADINA 软件所有功能；
- (2) 采用下拉菜单和弹出窗口方式执行操作或输入；
- (3) 大部分菜单的功能都有图标直接点击使用。

2. 模块选择区中定义的分析类型

使用 ADINA 应首先设置好的一项，选择适当的分析类型后，ADINA 部分菜单（主要是位于 MODEL 主菜单中选项）将随之改变；在 ADINA 功能区中定义选择适当的分析模块，然后在子功能区中选择分析类型。如结构分析模块中的分析类型包括：静态分析、模态分析、模态叠加瞬态分析、模态应力计算、振型参与因子计算、瞬态动力分析、线性屈曲分析、非线性屈曲分析等功能。这是计算的第一步。

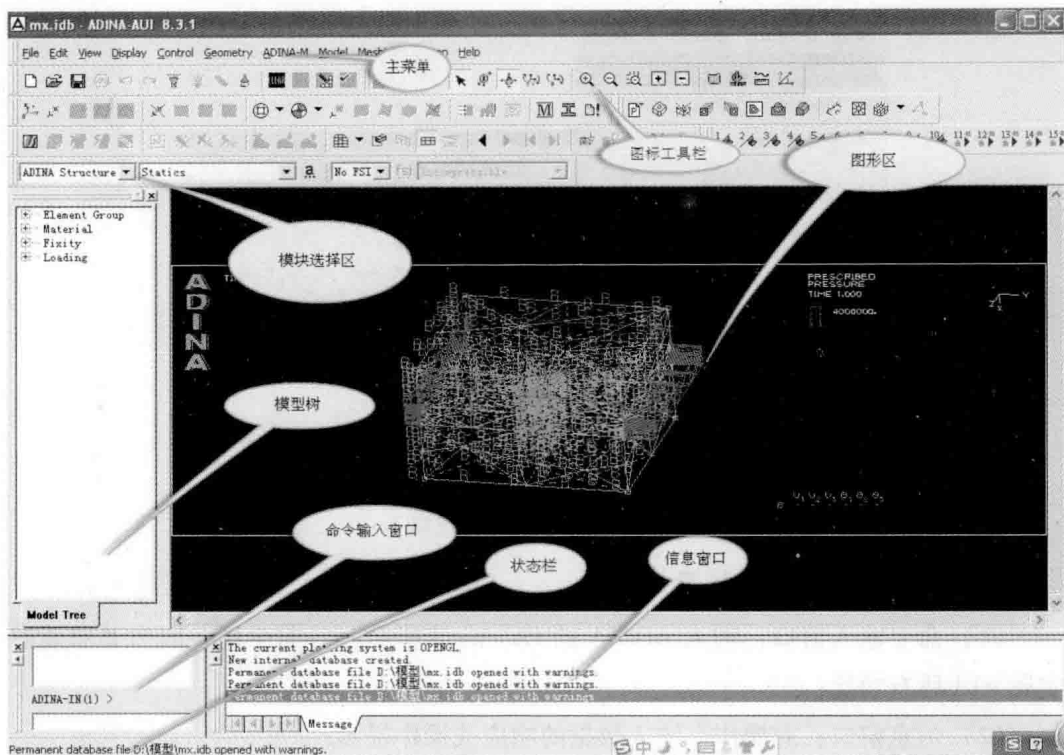


图 1-4 用户界面

3. 图标工具条

图标工具条包括 ADINA 大部分常见的操作，按照其功能相关性，分为五组：

- (1) General 工具栏：包含基本的 Windows 操作和视图功能；
- (2) 建模工具栏：包含所有的建模功能、材料和单元属性定义；
- (3) ADINA - M 建模工具栏：采用 Parasolid 方法建模工具；
- (4) 模型显示工具栏：以线框、阴影、实体等不同方式显示模型、模型节点、单元号等；
- (5) 后处理显示工具栏：包括绘制云图、矢量图、切片显示、动画等常用后处理功能。

4. 定制图形界面（如图 1-5 所示）

除了定制显示以外，还可以实现图标的添加与删除。在定制界面的 Commands 工具栏，单击要添加的工具按钮，按住鼠标左键拖到图形界面的工具栏中，可完成工具按钮的添加。在 Customize 界面打开的情况下，用鼠标拖动欲删除的工具按钮到工具栏以外区域，可实现图标删除。为了保证删除的可靠性，可将按钮拖到 Customize 界面来实现图标删除。

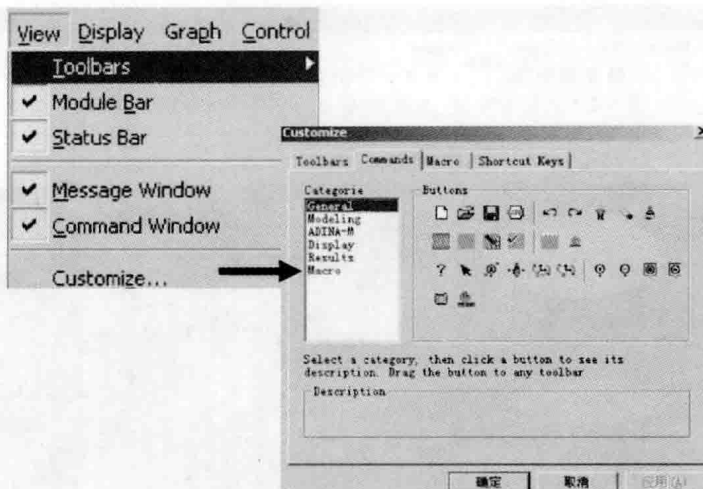


图 1-5 用户界面定制

5. 命令输入窗口和信息窗口

(1) 命令输入窗口：输入 ADINA 的 Command 指令，目前少用，因为菜单能够实现 AUI 所有功能；

(2) 信息窗口：对操作、输入数据的响应或操作提示；

(3) 这两个窗口可以由用户控制其打开或者关闭。

当鼠标放在图标等位置静止短时间后，将在鼠标附近出现对此图标的功能解释，并在界面的最底部出现更详细的说明。

四、文件系统

常用的文件类型包括：

- (1) 命令流文件 *.in；
- (2) 数据库文件 *.idb；
- (3) 结果文件 *.por(t)；
- (4) 重启动文件 *.res 等。

当模型中存在 Parasolid 几何模型时，存储数据库时同时生成两个文件，即 *.idb 和 *.x_t (Parasolid) 文件，当拷贝或移动数据库文件时，必须同时移动或拷贝几何模型的 *.x_t 文件。当模型中不存在 Parasolid 几何体时，数据库文件只有 *.idb 文件。新建、打开、保存文件等操作均可以在 File 菜单下实现，也可以通过单击快捷图标完成。

ADINA 软件附有详细的用户手册和例题，学习这些手册和例题是掌握软件的过程，也是建模的基础，本书建立在读者对 ADINA 软件有一定了解的基础上。如

果读者对 ADINA 软件不熟悉,可以在阅读过程中参考对照 ADINA 用户手册来进行。尽管所有有限元软件的计算和建模理论是一样的,但实际操作中还是有很大差异,因此,本书的建模方法,对于其他有限元软件来说,可以参考,但不能直接使用。

第三节 NATIVE 与 PARASOLID 建模方法

ADINA 支持两种几何建模方式:

(1) ADINA Native (Simple) 几何建模方式:几何元素包括 Point, Line, Surface, Volume;这是一种从底向上的建模方式,与几乎所有的 CAD、CAE 系统的几何建模概念相同;ADINA - Native 建模所有功能菜单位于 Geometry 主菜单下。

(2) ADINA Parasolid (B - Rep.) 几何建模方式:

ADINA - M 是采用 Parasolid (Unigraph) 的建模技术,这是最为广泛使用的 3D 复杂实体模型建模技术。其几何元素为 Body、Face、Edge;ADINA 中的 Parasolid 实体称为 ADINA - M 实体或 ADINA 的 B - Rep. 实体;ADINA 的 parasolid 建模功能菜单位于 ADINA - M 主菜单下。

在划分网格、施加约束、载荷等物理条件时,往往要求选择相应的几何元素,ADINA 区别两种不同建模类型的几何元素,即对于线、面、体,ADINA Native 和 Parasolid 模型的名称分别为:Line - Edge;Surface - Face;Volume - Body。在一个分析模型中,可以同时以不同的方式建模,并且 ADINA 提供两种实体网格连续的技术;两种模型的网格连续过渡往往使用到 Geometry > Face > Face Link 选项。两种建模方法的组合应用,为解决实际工程问题提供了强有力的工具,但同时需要注意,因为在 AUI 操作过程中需要区别两个几何元素,用户必须时刻清楚需要输入 Line、Surface、Volume 还是 Edge、Face、Body。

一、Native 建模方法简介

在 Geometry 菜单下单击 Coordinate Systems..., 定义坐标系。ADINA 缺省的坐标系是直角笛卡儿坐标系,标号为坐标系 0;通常用户构建几何模型时,使用缺省坐标系足够方便;仅当用户建模时使用局部坐标系更加方便的情况下,才有必要定义局部坐标系;可以创建多个局部坐标系,并任何时候使用 Set 功能激活任何已有的