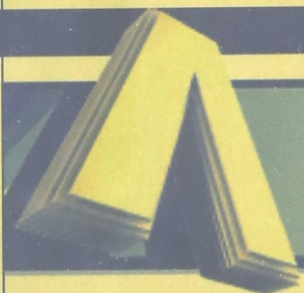
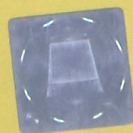


张胜民 编著



基于有限元软件 ANSYS 7.0 的结构分析



清华大学出版社

张胜民 编著

基于有限元软件 ANSYS 7.0的结构分析

清华大学出版社

北京

前 言

通用有限元软件 ANSYS 自问世以来,一直深受广大用户的青睐,在全世界拥有庞大的用户群。它强大的分析功能极大地提高了工程人员的工作效率,为各领域的工程设计、科学研究作出了杰出贡献。

本书基于 ANSYS 的最新版本 7.0,详细介绍了基于 ANSYS 进行结构分析的方法和步骤,并指出了分析过程中实用有效的操作技巧。全书内容丰富,涉及到结构分析各领域。对每一类结构分析问题,书中都深入浅出地剖析了解题的思路、要点,并精心设计了各型实例,给出了完整的解答过程,方便读者理解和掌握。

全书共分 8 章,分别对应于 ANSYS 在结构静力分析、非线性分析、动力分析、可靠性分析、优化设计、高级分析诸领域的有关内容。书的最后,特别介绍了 ANSYS/LS-DYNA 模块的功能、特点和使用方法,为应用显式动力分析解决工程问题的读者提供了参考。

本书可以作为大专院校相关专业学员和教师学习、使用 ANSYS 的教材或参考书,也可作为结构工程等诸多领域广大工程技术人员使用 ANSYS 的参考书。

由于编者水平有限,书中难免不当之处,欢迎广大读者批评指正。

编者

2003.6

目 录

第 1 章 ANSYS 软件概述	1
1.1 ANSYS 主要特点	1
1.2 ANSYS 操作界面	2
1.3 通用菜单	7
1.3.1 File 菜单	7
1.3.2 Select 菜单	8
1.3.3 List 菜单	10
1.3.4 Plot 菜单	11
1.3.5 PlotCtrls 菜单	11
1.3.6 WorkPlane 菜单	19
1.3.7 Parameters 菜单	20
1.3.8 其他菜单	21
1.4 主菜单	22
1.4.1 前处理器	22
1.4.2 求解器	30
1.4.3 后处理器	31
1.5 ANSYS 基本分析过程	35
第 2 章 结构静力分析	49
2.1 结构静力分析简介	49
2.2 静力分析在 ANSYS 上的实现	50
2.3 结构静力分析实例	51
2.3.1 平面桁架分析	51
2.3.2 梁分析	56
2.3.3 壳结构内力分析	64
2.3.4 三维实体建模	75
2.3.5 弹性地基梁分析	78
2.3.6 悬臂梁横截面剪力分析	84

第 3 章 结构非线性分析	95
3.1 非线性分析简介	95
3.1.1 材料非线性	95
3.1.2 屈曲分析	100
3.2 结构非线性分析在 ANSYS 上的实现	101
3.3 求解控制	109
3.4 结构非线性分析实例	115
3.4.1 特征值屈曲分析	115
3.4.2 大变形分析	126
3.4.3 接触分析	156
3.4.4 塑性分析	167
第 4 章 结构动力学分析	177
4.1 结构动力学概述	177
4.1.1 模态分析	177
4.1.2 瞬态动力学分析	178
4.2 基于 ANSYS 进行结构动力分析的步骤	179
4.2.1 模态分析步骤	179
4.2.2 谐响应分析步骤	182
4.2.3 瞬态动力学分析步骤	185
4.3 荷载步、子步、时间步	191
4.4 动力学分析实例	195
4.4.1 振动频率的计算	195
4.4.2 谐响应分析	202
4.4.3 瞬态动力学分析例 1	214
4.4.4 瞬态动力学分析例 2	222
第 5 章 结构可靠性分析	232
5.1 可靠性分析概述	232
5.1.1 数值模拟技术	233
5.1.2 结构可靠性分析的 APDL 语言面向对象程序设计	237
5.1.3 可靠性分析中常用的命令	241

5.2 可靠性分析实例	245
5.2.1 框架结构可靠性分析	245
5.2.2 板的可靠性分析	269
第 6 章 结构优化设计	279
6.1 结构优化设计概述	279
6.1.1 基于 ANSYS 进行优化设计的过程	279
6.1.2 分析注意事项及常见的分析命令	282
6.2 结构优化设计实例	284
6.2.1 桁架结构优化设计	284
6.2.2 框架结构的优化	298
6.2.3 板的优化设计	308
第 7 章 高级分析	319
7.1 高级分析概述	319
7.1.1 APDL 语言	319
7.1.2 复合材料	326
7.1.3 自适应网格划分和子结构、子模型	334
7.1.4 拓扑优化和单元的生死	335
7.2 高级分析实例	337
7.2.1 复合材料分析	337
7.2.2 单元的生和死	341
7.2.3 拓扑优化	347
7.2.4 自适应网格划分	351
7.2.5 圆盘的对径压缩	354
7.2.6 应力集中分析	362
第 8 章 ANSYS/LS-DYNA 使用基础	369
8.1 ANSYS/LS-DYNA 简介	369
8.2 LS-DYNA 功能特点	370
8.3 LS-DYNA 常用的前后处理器	374
8.4 ANSYS/LS-DYNA 基本使用方法	375
8.4.1 ANSYS/LS-DYNA 基本求解过程	375

8.4.2	LS-DYNA 输入文件数据格式	376
8.4.3	LS-POST 使用简介	378
8.5	ANSYS/LS-DYNA 分析实例	379
8.5.1	球形炸药在水介质中爆炸	379
8.5.2	弹丸高速侵彻钢板	395
参考文献		411

第 1 章 ANSYS 软件概述

1.1 ANSYS 主要特点

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元软件。从 1971 年的 2.0 版本到今天的 7.0 版本, ANSYS 从操作界面到分析功能等各方面都有巨大改进。它由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 公司开发, 能与多数 CAD 软件接口(如 Pro/Engineer、NASTRAN、Algor、I-DEAS、UG、SolidWorks、Inventor 等), 实现数据的共享和交换, 是现代产品设计中的高级 CAD 工具之一。

ANSYS 也是目前世界范围内增长最快的 CAE 软件, 是迄今为止世界范围内惟一通过 ISO 9001 质量认证的分析设计类软件, 是美国机械工程师协会(ASME)、美国国家核安全局(NQA)及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。在中国, 它是第一个通过中国压力容器标准化技术委员会认证, 并在 17 个部委推广使用的分析软件。

ANSYS 分析功能简述如下。

ANSYS 热分析主要用来计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数(热量的获取或损失、热梯度、热流密度等), 根据温度场性质的不同, 热分析可分为稳态热分析和瞬态热分析两类。稳态热分析用于确定稳定的热荷载对系统或部件的影响, 瞬态热分析用于计算一个系统随时间变化的温度场及其热参数。

ANSYS 电磁分析中考虑的物理量是电场强度、磁通密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、能耗及磁通量泄漏等, 功能包括:

- 静磁场分析: 计算直流电(DC)或永磁体产生的磁场。
- 交变磁场分析: 计算由于交流电(AC)产生的磁场。
- 瞬态磁场分析: 计算随时间随机变化的电流或外界引起的磁场。
- 电场分析: 分析电阻或电容系统的电场。

流体分析用于确定流体的流动及热行为, 可分为以下几类:

• CFD: ANSYS/FLOTRAN 提供强大的计算流体动力学分析功能, 可进行不可压缩流或可压缩流分析, 层流及湍流分析, 多组份流分析等。

• 声学分析: 考虑流体介质与周围固体的相互作用, 进行声波传递或水下结构的动力学分析。

- 容器内流体分析: 考虑容器内非流动流体的影响对流体予以分析。

ANSYS 土木工程专用包 ANSYS/CivilFEM 用来研究钢结构、钢筋混凝土及岩土结构的特性,如房屋、桥梁、大坝、洞室与隧道建筑,地下建筑物的受力、变形、稳定性及地震响应等情况。

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。根据力学性质的不同,ANSYS 的结构分析可分为静力分析、动力学分析(模态分析、谐响应分析、瞬态动力学分析、谱分析)、非线性分析(几何非线性分析、材料非线性分析、状态非线性分析)、优化设计、可靠性分析等几类。

结构分析中计算得出的基本未知量(节点自由度)是位移,其他的一些未知量如应变、应力和反力可通过节点位移导出。

静力分析用于求解静力荷载作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、旋转软化、大应变、超弹性、粘塑性、接触和蠕变等各类情况。

模态分析用于计算结构的固有频率和模态。

谐响应分析用于确定结构在随时间正弦变化的荷载作用下的响应。

瞬态动力分析用于计算结构在随时间任意变化的荷载作用下的响应,分析过程中允许非线性性质。

谱分析是模态分析的应用拓广,用于计算由于响应谱或 PSD 输入(随机振动)引起的应力和应变。

屈曲分析用于计算屈曲荷载和确定屈曲模态。ANSYS 可进行线性(特征值)和非线性屈曲分析。

另外,ANSYS 特殊的分析应用还包括断裂力学计算、复合材料分析、疲劳计算、显式动力分析(利用 ANSYS/LS-DYNA 进行高度非线性动力学分析,如爆破分析以及复杂接触问题的计算等)。

后续章节将对如何基于 ANSYS 实现上述结构分析功能结合理论和实例予以详细介绍。

1.2 ANSYS 操作界面

在介绍 ANSYS 分析问题的具体过程之前,先谈谈如何进入 ANSYS 操作界面,同时对 ANSYS 的界面组成以及 ANSYS 的工作方式进行一些介绍,增强读者对 ANSYS 的感性认识。

选择【开始】菜单中的【程序】命令,接着选择【ANSYS Release 7.0】命令,弹出如图1-1所示的菜单。菜单中 ANSYS Batch 代表 ANSYS 的批处理计算模式;选择 Help,可以进入 ANSYS 帮助系统;单击 ANSYS Interactive 表示采用交互模式(GUI 方式)进行求解;

LS-DYNA Solver 是 LS-DYNA 求解器,用于显式动力分析的求解。

进入 ANSYS 界面,可单击 ANSYS Interactive 或 ANSYS。单击 ANSYS 表示直接以上次离开 ANSYS 时的相关设置进入 ANSYS 图形界面。单击 ANSYS Interactive,会弹出如图 1-2 所示的窗口。

图 1-2 是进入 ANSYS 分析界面前设定分析环境选项的对话框。在图 1-2 中,Product selection 下拉列表框中是 ANSYS 产品的型号,常用的产品型号有 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/

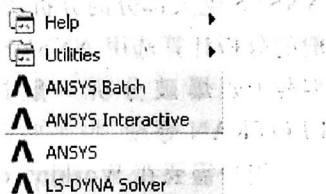


图 1-1 【开始】菜单中的 ANSYS 选项

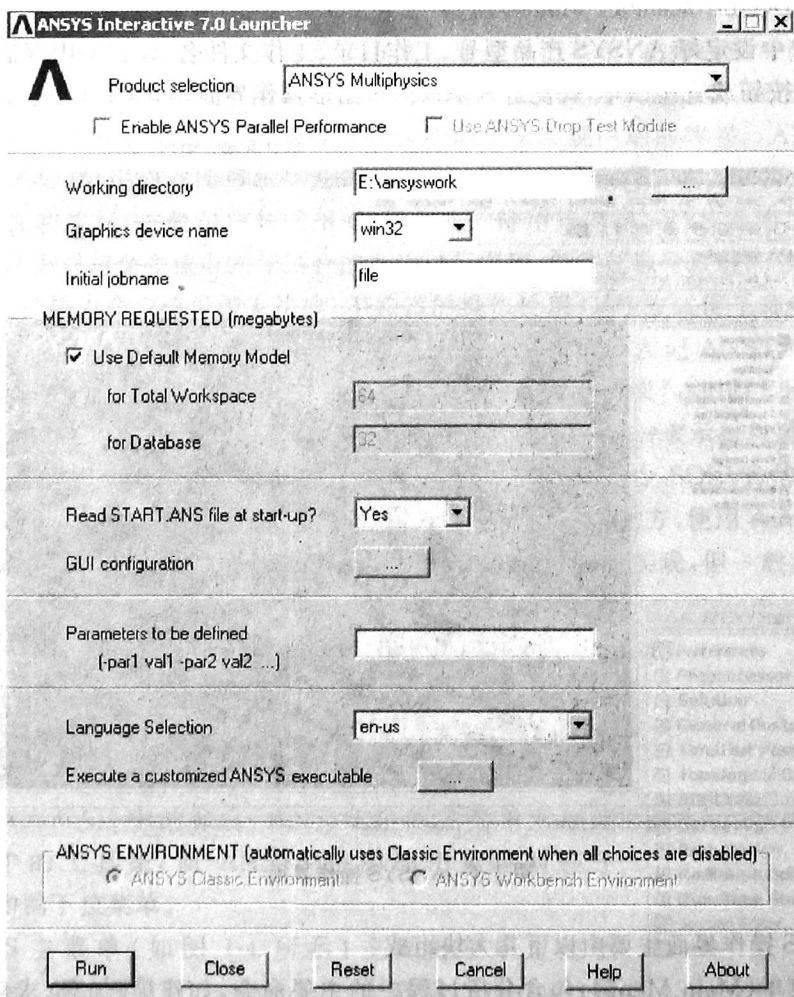


图 1-2 ANSYS 工作环境选项对话框

Mechanical、ANSYS/Structural、ANSYS/Professional 等。ANSYS/Multiphysics 包含了 ANSYS 绝大部分的分析功能,应用范围最为广阔,是一个多物理场耦合的分析程序,一般的分析计算选用 ANSYS/Multiphysics 即可。专门的分析与计算则需选择特定的产品型号(如爆破分析一般选用 ANSYS/LS-DYNA,流体分析一般可选用 ANSYS/FLOTRAN 等)。

用户需要在 Working directory 设置框中设置工作路径。用户可根据自己的需要和喜好创建和设定工作文件夹。Initial jobname 设置框用来设定工作文件名(在进入图形操作界面后,还可以根据需要进行更改工作文件名),ANSYS 默认的工作文件名为 file。MEMORY REQUESTED 区域用来设定分析计算的内存需求,一般可以采用系统默认值(激活 Use Default Memory Model)。

在窗口中设定好 ANSYS 产品型号、工作目录、工作文件名、计算的内存需求后,单击 Run(运行)按钮或直接回车,就能进入 ANSYS 图形操作界面,如图 1-3 所示。

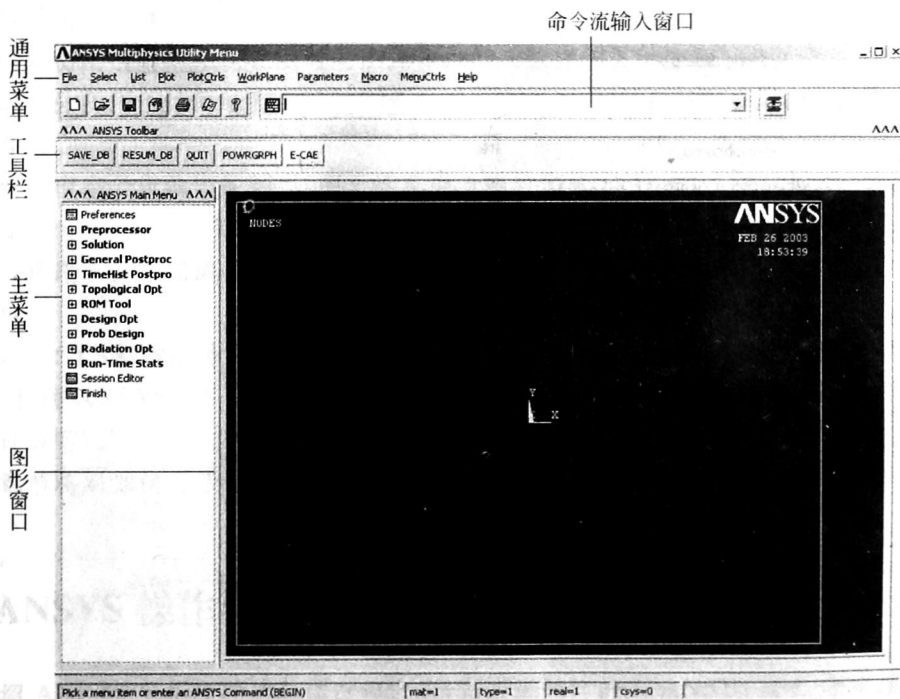


图 1-3 ANSYS 操作界面

ANSYS 操作界面主要由以下几大块组成:

- 主菜单(Main Menu):包含分析过程中的主要命令,如建模、加载、求解以及结果的显示等。

• 通用菜单(Utility Menu):主题内容与主菜单基本一致(但也包含一些主菜单没有的操作以方便用户)。

• 工具栏(Toolbar):主要包含一些快捷方式,常用的有存盘(SAVE_DB)、恢复(RESUME_DB)、退出系统(QUIT)。

• 命令流输入窗口(Input Window):用来输入命令。一般来讲,掌握一些常用的 ANSYS 命令对操作是很有裨益的,以菜单操作为主辅以命令流进行操作常会带来方便和快捷。

• 图形窗口(Graphic Window):显示用户所建的模型及分析结果。

• 输出窗口(Output Window):记录、显示用户所执行的任何一道指令。

ANSYS 的使用有两种方式:GUI 方式和命令流方式。GUI(Graphical User Interface)方式即图形拾取方式(或称菜单方式),通过单击菜单,在弹出的对话框中输入参数,进行相应的设置从而进行问题的分析与求解。命令流方式是指在 ANSYS 的命令流输入窗口输入求解所需的命令,通过执行这些命令来实现问题的解答。ANSYS 对命令的大小写不敏感,用户在编写命令流时可随意选择大写或小写。因为 ANSYS 的命令流较难于掌握和编写,一般用户均采用 GUI 方式。待用户对 ANSYS 常用的命令熟悉后,采用 GUI 方式与命令流方式相结合的办法进行求解,往往能取得较好的效果(对于熟悉的操作,直接输入命令流可带来快捷;不熟悉的操作使用 GUI 方式便于理解和接受)。ANSYS 命令一般为对应操作的英文名简写,用户不必刻意地去强记 ANSYS 命令,通过大量实例练习在一定程度上可以熟悉常用的命令,做到“见名知义”,如 E(Element)表示单元类型,R(Real constant)表示实常数,MP(Material Properties)表示材料属性等。

主菜单、通用菜单以及 ANSYS 常见的一些命令(如求解命令 SOLVE 等)在实际的分析过程中使用的频率非常高。以常用的 AutoCAD 软件打个比方,使用 AutoCAD 画图时,大部分操作既可以用命令,也可以用工具条或者下拉菜单来实现,但一般都习惯以工具条为主进行作图。ANSYS 分析时的主要操作,可以用命令流来实现,也可以用菜单实现,但用户一般通过菜单实现(GUI 方式)。ANSYS 通过菜单实现的功能里,大部分功能用户一般都通过主菜单实现,而对给操作带来便捷的一些特殊操作则由通用菜单实现。可以近似地这样理解,ANSYS 中的命令流代码对应于 AutoCAD 中的命令,ANSYS 中的主菜单对应于 AutoCAD 中的工具条,而 ANSYS 中的通用菜单对应于 AutoCAD 中的下拉菜单。

ANSYS 主菜单(如图 1-4 所示)主要由菜单过滤器(Preferences)、前处理器(Preprocessor)、求解器(Solution)、通用后处理器(General Postproc)、时间历程后处理器(TimeHist

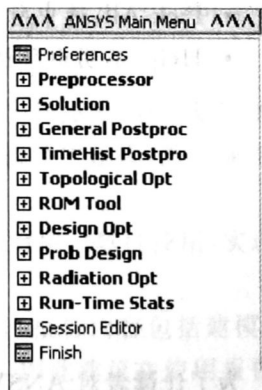


图 1-4 ANSYS 主菜单

Postpro)、拓扑优化处理器(Topological Opt)、优化处理器(Design Opt)、概率设计处理器(Prob Design)组成。

通用菜单组成包括 File、Select、List、Plot、PlotCtrls、WorkPlane、Parameters、Macro、MenuCtrls、Help 等下拉菜单,如图 1-5 所示。

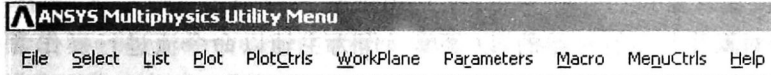


图 1-5 通用菜单

这些菜单的主要用途和主要用法在 1.3 节和 1.4 节中将有重点介绍。

【注意】单击主菜单或通用菜单,可以看到存在 4 种不同的菜单后缀符号,它们的含义是:

- > 表示还可以弹出级联菜单。
- + 表示将弹出一个图形选取对话框。
- ... 表示将弹出一个输入对话框。
- 如果没有菜单后缀,就表示直接执行一项功能,不需要进行下一步操作。这样的菜单通常对应着不带参数的命令。

在 ANSYS 中,对话框提供了数据输入的基本形式。典型的对话框(如图 1-6 所示)中一般包括如下的作用按钮:

- OK: 表示确定对话框中的输入并退出对话框。
- Apply: 确定对话框中的输入但不退出该对话框。
- Reset: 重新设置对话框中的内容,将其恢复到 ANSYS 的默认值(当操作有误时可以单击该按钮)。
- Cancel: 不执行对话框中的设置同时退出对话框。
- Pick All: 选中所有选项同时退出对话框。
- Help: 不明白所执行操作的含义时,单击该按钮可以获取相应的帮助信息。

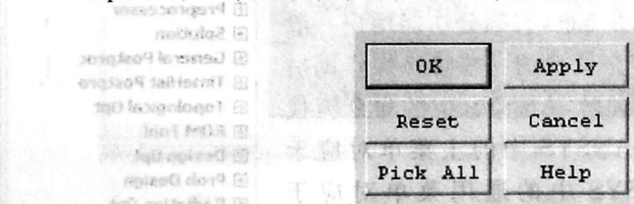


图 1-6 ANSYS 对话框的按钮

为了让读者对 ANSYS 的操作界面、菜单功能有较好的了解,逐步培养基于 ANSYS 进行问题分析的“意识”,1.3 节和 1.4 节将对通用菜单、主菜单的常用功能和操作予以介

绍,读者可以充分感受到 ANSYS 分析功能的强大以及操作的便捷。读者在初次阅读时可能会有一些不解,但相信读者学习完后续章节的理论和实例,一切疑难都会不攻自破。

1.3 通用菜单

1.3.1 File 菜单

选择 Utility Menu > File 命令,弹出 File 菜单如图 1-7 所示,它主要用来进行 ANSYS 文件的管理。

选择 Utility Menu > File > Clear&Start New 命令,弹出 Clear Database and Start New 对话框,如图 1-8 所示。

单击 OK 按钮,弹出 Verify 对话框,如图 1-9 所示,单击“是”按钮,则将原有的有限元模型的数据库清空。求解出现错误需要重新进行分析时必须执行清空数据库的操作。

File 菜单中常用的其他选项包括:

- Change Jobname:更改工作文件名。
- Change Title:定义分析标题。
- Save as Jobname.db:保存当前资料(作用相当于工具栏中的 SAVE_DB 按钮;如果用户需要采用其他的文件名存盘,可以选择 Save as 选项)。

• Resume Jobname.db:将数据库恢复至上次保存时的状态(相当于工具栏中的 RESUM_DB 按钮;如果用户需要从其他的数据库文件恢复,可以选择 Resume from 选项)。

• Read Input from:读入文本文件(将求解代码置于文本文件中,通过读入文件,顺序执行文件中包含的操作命令,可以十分快捷地求解有限元问题)。

• Import:输入实体模型(ANSYS 自身建模的功能并非十分强大,对于复杂的建模问题,用户可以在 Pro/E、UG、Inventor、SolidWorks、Ideas 等软件中建模,然后通过此选项将模型导入 ANSYS 中进行分析)。

• Export:将 ANSYS 中的模型以 IGES 格式导出供其他有限元软件使用,实现资源共享。

• Report Generator:分析结束后生成 ANSYS 分析报告(报告内容包括建模过程、求解信息、分析结果等;由于 ANSYS 对中文的支持程度不好,因此建议在使用报告生成器来生成报告时,尽量使用英文,这样可避免编码错误)。

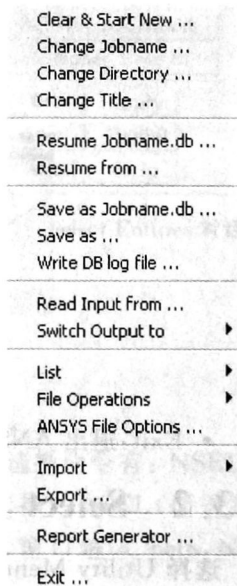


图 1-7 File 菜单

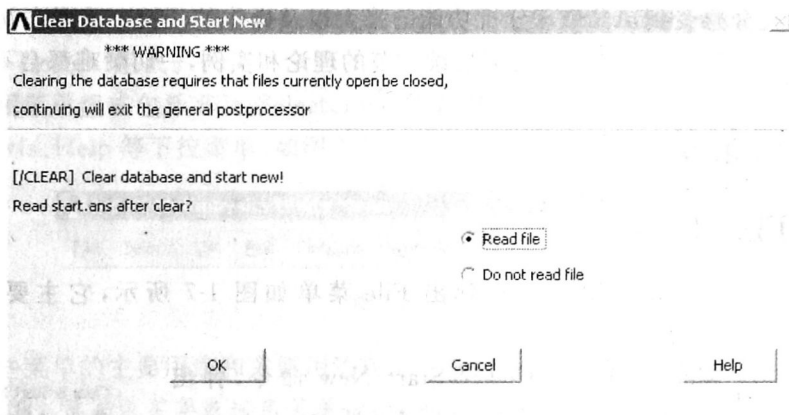


图 1-8 Clear Database and Start New 对话框

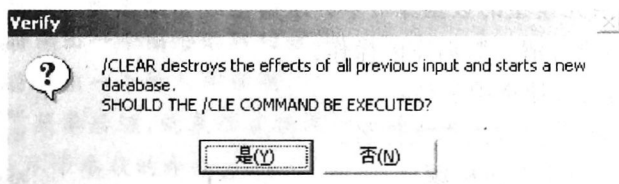


图 1-9 Verify 对话框

- Exit:退出 ANSYS(相当于工具栏中的 QUIT 按钮)。

1.3.2 Select 菜单

选择 Utility Menu>Select 命令,弹出 Select 菜单如图 1-10 所示。

通过 Select 菜单可将有限元模型的一部分从整个模型中分离出来。当要对模型的一部分进行操作时,非常需要采用 Select 操作,如显示结构某感兴趣部分的应力云图等。在后处理中,选择功能有时极为有用,如根据需要进行选择模型的一部分来显示、输出结果等。执行选择操作后,模型中未被选中的部分仍存储于数据库中,并未被删除,只是暂时不能对其进行操作。

Select 菜单各项中应用最多的是实体选择。实体选择操作一般分 3 步:

- (1) 选择 Utility Menu>Select>Entities 命令,弹出 Select Entities 对话框,如图 1-11 所示,在对话框中进行设置,选中实体;
- (2) 对选中的实体进行所需的操作;

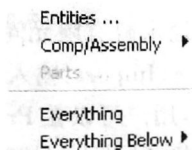


图 1-10 Select 菜单

(3) 重新选取整个模型(选择 Utility Menu>Select>Everything 命令)。

Select Entities 对话框中,Nodes 下拉列表框对应选项为实体类型。ANSYS 中实体类型包括节点(Nodes)、单元(Element)、关键点(Keypoints)、线(Lines)、面(Areas)、体(Volumes)等。By Num/Pick 下拉列表框对应选项为实体选择方式,实体选择方式随实体类型的不同而不同,常见的选择方式有 By Num/Pick(通过编号或拾取来选择)、By Location(根据位置坐标的不同识别)、By Results(根据结果的差异判断)、By Attributes(根据材料属性、实常数、单元类型编号的不同选取)等。

From Full、Reselect 等单选钮表示实体选择的范围,具体含义如下:

- From Full: 从数据的全集中选择。
- Reselect: 从选中的子集中再选择。
- Also Select: 从整个模型中选择并添加到当前集中。
- Unselect: 从当前集中删除选中的模型。
- Select All: 恢复全集。
- Invert: 在激活与非激活的部分之间转换。

实际选择操作中可利用上述选项功能的组合来选择所需实体。

与菜单操作对应,实体的选择也可以通过命令来实现,常用的选择命令有: NSEL(节点选择)、ESEL(单元选择)、KSEL(关键点选择)、LSEL(线段选择)、ASEL(面选择)、VSEL(体选择)等。这些命令的详细用法可以通过在命令输入窗口输入 help, Name (Name 为待查询详细用法的命令)获得。

【注意】ANSYS 命令众多且较难于记忆,不便理解,初学者没有必要去刻意追求通过命令来实现操作,通过大量实际的操作和练习,就可以理解和掌握常用的命令。

与 AutoCAD 中的块操作类似,作为选择功能的强化,对一组图元进行反复操作时可通过给选中的图元命名创建组件来方便操作。另外,在 ANSYS 接触分析中,组件的生成和使用是问题求解的关键。

创建组件的操作如下:

(1) 选择 Utility Menu>Select>Entities 命令,通过 Select Entities 对话框选择一组图元;

(2) 选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令,弹出 Create Component 对话框,如图 1-12 所示,在 Component name 设置框中输入组件名,单击 OK 按钮,即可将选中的图元定义为组件。

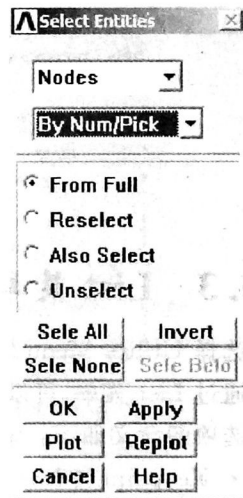


图 1-11 Select Entities 对话框