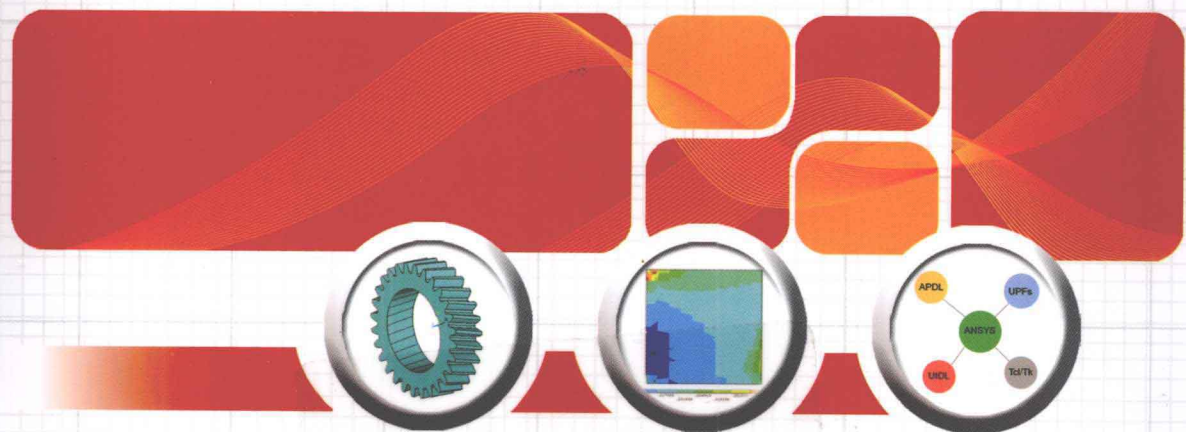


万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS

二次开发及应用实例详解



师访 编著

- 针对二次开发功能，利用简单的模型，使分析过程和计算结果清晰明了
- 丰富且经过验证的案例，读者可轻松再现案例过程
- 提供命令流、用户子程序源代码、数据文件和宏文件等各类文件近100个



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 二次开发及应用实例详解

师访 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分三篇，第一篇是二次开发基础篇，共3章来讲解二次开发的工具和UPFs的基础。第二篇是APDL二次开发篇，共4章来讲解APDL参数化建模、APDL优化设计、APDL本构模型开发、APDL数据处理等方面知识；第三篇是UPFs二次开发篇，共4章来讲解材料本构关系的UPFs二次开发、复杂材料本构模型的二次开发、UPFs开发单元的两种方法和应用实例以及其他UPFs二次开发的实例，比如用户自定义命令、用户自定义输出、用户自定义载荷等。

针对二次开发功能，本书所举的说明性例子都较为简单，简单的模型不仅能使分析过程和计算结果清晰明了，更能使介绍的重点放在ANSYS二次开发上，有利于读者的学习。本书的案例非常丰富，而且这些案例都是经过验证的，读者可以轻松地再现案例过程。

本书可作为学习ANSYS二次开发的参考用书，但要求读者对ANSYS较为熟悉，且拥有一定的有限元理论基础。适合机械、土木工程、力学、电子电气等工科专业本科高年级以及研究生灵活掌握ANSYS分析技术的参考书。

本书提供各类文件近100个，包括各章节应用实例的命令流文件、用户子程序源代码、数据文件和宏文件等，可免费到中国水利水电出版社网站和万水书苑下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和<http://www.wsbookshow.com>。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS二次开发及应用实例详解 / 师访编著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2012. 1
(万水ANSYS技术丛书)
ISBN 978-7-5084-9235-3

I. ①A… II. ①师… III. ①有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①O241.82

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第258590号

策划编辑: 杨元泓 责任编辑: 杨元泓 封面设计: 李 佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书
作 者	ANSYS 二次开发及应用实例详解
出版发行	师访 编著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 24印张 590千字
版 次	2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷
印 数	0001—5000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

ANSYS 是一款功能强大的大型通用有限元软件,它具有强大的前后处理和计算分析能力,应用范围极广,得到了广大工程技术人员和科研人员的认可。虽然 ANSYS 软件功能已十分强大,但仍旧为用户提供了多个二次开发工具:APDL(参数化设计语言)主要用于完成一些通用性强的任务,如参数化建模,创建专用分析程序等;UPFs(用户可编程特性)用于从 FORTRAN 源代码的层次对 ANSYS 进行二次开发,包括开发材料本构模型、开发新的单元、定义用户载荷等;UIDL 和 Tcl/Tk 用于创建用户定制界面。本书介绍的重点是 APDL 和 UPFs。本书共分三篇,分别是:二次开发基础篇、APDL 二次开发篇和 UPFs 二次开发篇。

第一篇共 3 章,第 1 章首先简单介绍 ANSYS 软件和其他一些商业的以及开源的有限元软件,然后介绍 ANSYS 二次开发的 4 个工具,对于 UIDL 和 Tcl/Tk,分别给出了一个应用实例。第 2 章介绍 APDL 的基本知识,包括 APDL 语言基础和 APDL 宏。第 3 章介绍 UPFs 基本知识,其中 3.2 到 3.4 节详细介绍各个用于 UPFs 二次开发的 FORTRAN 子程序。

第二篇共 4 章,其中第 4 章主要介绍 APDL 参数化建模和专用分析程序。第 5 章介绍 APDL 优化设计的相关知识,并给出了一个几何尺寸优化分析的例子。第 6 章介绍 APDL 本构模型开发的例子。第 7 章介绍 APDL 数据处理的一些应用实例。

第三篇共 4 章,其中第 8 章主要介绍材料本构关系的 UPFs 二次开发应用实例。在第 8 章的基础上,第 9 章介绍复杂材料本构模型二次开发的方法。第 10 章介绍利用 UPFs 开发单元的两种方法和应用实例。第 11 章介绍其他 UPFs 二次开发的实例,比如用户自定义命令、用户自定义输出、用户自定义载荷等,最后一节介绍基于 Visual Basic 的 ANSYS 二次开发方法。

由于本书作者从事岩土工程方面的研究,因而书中给出的岩土工程的例子稍多,但这些例子专业性都不强,不影响非岩土工程专业读者的学习。针对二次开发功能,本书所举的说明性例子都较为简单,简单的模型不仅能使分析过程和计算结果清晰明了,更能使介绍的重点放在 ANSYS 二次开发上,有利于读者的学习。本书的案例非常丰富,而且这些案例都是经过验证的,读者可以轻松地再现案例过程。此外还需说明,为了节省篇幅,本书在进行介绍时全部以 APDL 命令流为主,没有给出 GUI 操作路径。

本书提供各类文件近 100 个,包括各章节应用实例的命令流文件、用户子程序源代码、数据文件和宏文件等,可到中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载,网址为:<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>。

本书可作为广大 ANSYS 用户学习 ANSYS 二次开发的参考用书,但要求读者对 ANSYS 较为熟悉,且拥有一定的有限元理论基础。通过认真学习本书内容,读者可对 ANSYS 二次开发方法有基本的认识,为实现读者自己的二次开发功能提供参考。

感谢导师高峰教授对编写本书的大力支持,感谢中国矿业大学与工程科学系各位同事的

帮助。感谢中国仿真互动网（www.Simwe.com）各位热心网友的支持。在本书的编辑过程中，参与具体工作的还有：李伟、景小艳、许志清、刘军华、夏惠军、张赛桥、姚新军、张强林、张代全、万雷、王斌、江广顺、李强、余松、郭敏、董茜、陈鲲、王晓、李晓宁、丁佳、虞志勇、吴艳。在本书创作期间获得中国水利水电出版社老师的大力支持，正是他们的辛苦付出，才使得本书能够在第一时间面向读者。若读者在学习过程中发现问题或有更好的建议，可以通过 www.dozan.cn/bbs 与我们联系。

由于 ANSYS 二次开发涉及的范围极广，本书有限的篇幅无法一一深入介绍，故无法满足所有读者的需要。此外，由于作者水平有限，难免存在疏漏和错误，敬请广大读者批评指正。

编者

2011 年 11 月

目 录

前言

第一篇 二次开发基础篇

第 1 章 ANSYS 软件及其二次开发工具	1	3.2.4 修改和监视已存在单元的用户子程序	71
1.1 ANSYS 简介	1	3.2.5 载荷用户子程序	77
1.1.1 ANSYS 的发展历程	1	3.2.6 支持子程序	86
1.1.2 ANSYS 12.0 的组成	2	3.2.7 计算干预用户子程序	89
1.1.3 其他有限元软件	4	3.2.8 自定义命令用户子程序	90
1.2 ANSYS 二次开发工具	8	3.2.9 内存管理子程序	90
1.2.1 APDL 参数化设计语言	9	3.2.10 参数处理子程序	91
1.2.2 UPFs 用户可编程特性	9	3.2.11 其他有用的子程序和命令	93
1.2.3 UIDL 界面设计语言	10	3.3 访问 ANSYS 数据库的子程序	94
1.2.4 Tcl/Tk 语言	14	3.3.1 选择或获得节点及单元的子程序	95
第 2 章 APDL 基本知识	17	3.3.2 节点信息相关子程序	95
2.1 APDL 语言基础	17	3.3.3 单元特征相关子程序	95
2.1.1 APDL 参数及数组	17	3.3.4 耦合及约束相关子程序	97
2.1.2 APDL 程序控制	26	3.3.5 节点载荷子程序	97
2.1.3 APDL 语言编辑器	27	3.3.6 单元载荷子程序	99
2.2 APDL 宏	29	3.3.7 结果信息子程序	102
2.2.1 创建 APDL 宏	29	3.4 方便用户开发的子程序	107
2.2.2 APDL 宏的运行	31	3.4.1 通用子程序	107
2.2.3 参数传递	32	3.4.2 向量操作子程序	113
2.2.4 APDL 宏简单实例	33	3.4.3 矩阵操作子程序	119
第 3 章 UPFs 基本知识	35	3.5 UPFs 的编译连接与激活	126
3.1 UPFs 基础	35	3.5.1 FORTRAN 编译器及系统设置	126
3.1.1 UPFs 的功能	35	3.5.2 编译连接过程	130
3.1.2 使用 UPFs 的建议	36	3.5.3 使用 FORTRAN 之外的语言编译连接	132
3.1.3 inc 文件	36	3.5.4 激活 UPFs 的方法	135
3.1.4 关于程序的调试	37	3.6 UPFs 应用实例	138
3.1.5 UPFs 的构成	42	3.6.1 利用 UPFs 计算单元长度	138
3.2 UPFs 基本子程序	42	3.6.2 编译连接	139
3.2.1 本构模型开发用户子程序	42	3.6.3 结果验证	140
3.2.2 单元开发用户子程序	54		
3.2.3 单元开发支持子程序	55		

第二篇 APDL 二次开发篇

第 4 章 参数化建模及分析	142	6.1.1 Duncan-Chang 模型介绍	169
4.1 APDL 参数化建模及分析基础	142	6.1.2 Duncan-Chang 模型算法	170
4.1.1 APDL 参数化建模基础	143	6.2 APDL 实现过程	172
4.1.2 APDL 通用分析程序	143	6.2.1 生成并调用宏文件	172
4.2 建立参数化弹簧模型	143	6.2.2 APDL 实现过程	173
4.2.1 问题描述	143	第 7 章 数据处理	176
4.2.2 模型建立	144	7.1 自定义输出文件格式	176
4.3 建立渐开线圆柱齿轮模型	146	7.1.1 ANSYS 输出文件格式的设置	176
4.3.1 问题描述	146	7.1.2 用户自定义输出格式	180
4.3.2 模型建立	147	7.2 建立 ABAQUS 输入文件	181
4.4 采矿过程专用应力分析程序	151	7.2.1 ABAQUS inp 文件一般格式	181
4.4.1 问题描述	152	7.2.2 利用 ANSYS 输出 inp 文件	183
4.4.2 参数化模型	154	7.3 向量和矩阵操作	187
4.4.3 开挖求解及后处理	157	7.3.1 向量操作基础	187
4.4.4 分析实例	158	7.3.2 应用实例	187
第 5 章 优化设计	160	7.4 用户自定义动画	193
5.1 APDL 优化设计基础	160	7.4.1 ANSYS 动画显示基础	193
5.1.1 ANSYS 优化分析的概念	160	7.4.2 自定义动画的方法	194
5.1.2 优化算法	161	7.4.3 应用实例	194
5.1.3 APDL 优化设计的步骤	163	7.5 刚度矩阵可视化	199
5.2 梁截面尺寸优化设计	164	7.5.1 刚度矩阵的图形化输出方法	199
5.2.1 问题描述	164	7.5.2 Harwell-Boeing 文件格式	200
5.2.2 APDL 优化过程	165	7.5.3 矩阵稀疏率	201
5.2.3 优化结果分析	166	7.5.4 测试模型	201
第 6 章 APDL 本构模型开发	169	7.5.5 相关宏文件说明	202
6.1 Duncan-Chang 本构模型算法	169		

第三篇 UPFs 二次开发篇

第 8 章 简单材料模型的二次开发	206	8.2.1 UserHyper 用户子程序	216
8.1 简单弹性材料模型	206	8.2.2 模型算法	217
8.1.1 usermat 子程序介绍	206	8.2.3 数值实施	217
8.1.2 应力更新	210	8.2.4 橡胶材料受力分析	219
8.1.3 一致切线算子矩阵	211	8.3 考虑损伤的材料模型	223
8.1.4 单轴拉伸试验模拟	214	8.3.1 弹性损伤本构方程	223
8.2 超弹性材料模型	216	8.3.2 数值实施	224

8.3.3 应用实例	228	10.2.1 用户定义单元 API	297
8.4 蠕变材料模型	230	10.2.2 直接访问单元相关数据库和文件	299
8.4.1 隐式蠕变与显式蠕变	230	10.2.3 两种方法的区别	299
8.4.2 usercreep 用户子程序	231	10.3 用户定义单元 API	301
8.4.3 模型算法	232	10.3.1 UserElem 用户子程序	301
8.4.4 数值实施	233	10.3.2 ElemGetMat 子程序	305
8.4.5 零件锻造过程模拟	236	10.3.3 单元验证	308
8.5 用户自定义破坏准则	241	10.4 直接访问单元相关数据库和文件	322
8.5.1 userfc 用户子程序	241	10.4.1 uec 用户子程序	323
8.5.2 模型算法	241	10.4.2 uel 用户子程序	324
8.5.3 数值实施	242	10.4.3 uex 用户子程序	325
8.5.4 层合板受力破坏模拟	244	10.4.4 uep 用户子程序	325
8.6 桩土相互作用弹簧本构的开发	247	10.4.5 usertr 和 userac 用户子程序	326
8.6.1 问题描述	247	10.5 三维杆单元的开发	328
8.6.2 模型算法	249	10.5.1 LINK8 单元描述	329
8.6.3 数值实施	250	10.5.2 uec 用户子程序	330
8.6.4 应用实例	255	10.5.3 uel 用户子程序	332
第 9 章 复杂弹塑性材料模型的二次开发	259	10.5.4 单元验证	343
9.1 塑性理论基础	259	第 11 章 其他二次开发功能	345
9.1.1 屈服准则	260	11.1 用户自定义命令	345
9.1.2 强化准则	265	11.1.1 基本步骤	345
9.1.3 流动法则	266	11.1.2 应用实例	346
9.1.4 写成矩阵形式	268	11.2 用户自定义输出	354
9.1.5 用应力不变量表示的屈服函数	268	11.2.1 基本介绍	355
9.2 Drucker-Prager 本构模型的开发	271	11.2.2 应用实例	355
9.2.1 一致切线算子矩阵	271	11.3 用户自定义载荷	362
9.2.2 应力更新过程	273	11.3.1 基本介绍	362
9.2.3 usermat 代码	276	11.3.2 应用实例	363
9.2.4 边坡稳定性分析	281	11.4 用户自定义优化程序	366
第 10 章 单元二次开发	285	11.4.1 使用自定义优化程序的方法	366
10.1 有限单元法基本理论	285	11.4.2 userop 用户子程序	366
10.1.1 几何方程与形函数	286	11.5 基于 Visual Basic 的 ANSYS 二次开发	370
10.1.2 虚功原理与有限元方程	287	11.5.1 Visual Basic 与 ANSYS 的接口	370
10.1.3 等参元	288	11.5.2 应用实例	371
10.1.4 数值积分	292	常见错误及调试	373
10.1.5 ANSYS 单元相关知识	294	参考文献	374
10.2 开发单元的两种方法	297		

ANSYS 软件及其二次开发工具

ANSYS 作为有限元领域的大型通用程序，在工业应用领域及科研方面均有深入的应用。其广泛而有效的分析工具能解决各类问题，如结构、流体、热、电磁问题等，同时 ANSYS 还为高级用户提供了多种二次开发工具，利用这些工具，用户可以高效地扩充 ANSYS 的功能。本章对 ANSYS 软件和其他商业软件，以及开源软件进行了简单介绍，然后分别对 ANSYS 的 4 个二次开发工具 APDL、UPFs、UIDL 及 Tck\Tk 进行了介绍。

本章要点:

- 各商业及开源有限元软件的介绍
- ANSYS 的 4 个二次开发工具

1.1 ANSYS 简介

若要对 ANSYS 进行二次开发，首先有必要对 ANSYS 软件的发展及其组成部分有所了解，对 ANSYS 软件的结构有了整体的把握才能有的放矢、目标明确的进行相关二次开发工作。本节简要介绍 ANSYS 公司及 ANSYS 软件的发展历程，然后介绍 ANSYS 12.0 软件的组成，最后给出一些其他商业及开源有限元软件的简单介绍。

1.1.1 ANSYS 的发展历程

ANSYS 公司于 1970 年在美国成立，创始人 John Swanson 博士是匹兹堡大学力学系教授，公司总部位于美国宾西法尼亚州的匹兹堡。经过四十年的发展，ANSYS 在有限元软件领域占据了举足轻重的地位，被世界各工业领域广泛接受，成为全球众多专业技术协会认可的标准分析软件。ANSYS 集成了力学、热学、电学、声学、流体等多个模块，可用于航空航天、汽车、电子电气、国防军工、铁路、造船、石油化工、能源电力、核工业、土木工程、冶金与成形以及生物医学等各个领域。

ANSYS 公司于 2003 年开发设计了新一代 CAE 仿真平台 ANSYS Workbench。ANSYS

Workbench 由各种功能丰富的模块组成，有 Windows 风格的优化易用的界面，能直接读入常用的各种格式的模型文件，并具有良好的数据交换能力和强大的协同仿真环境。新版的 ANSYS 软件产品的灵活性、易用性和强大的功能都达到了数值分析软件的一个新高度。

近年来，随着 ANSYS 公司实力的增强，不断收购其他 CAE 软件公司，进一步扩充了 ANSYS 软件的功能。例如，ANSYS 公司于 2006 年收购了在流体领域处于领先地位的美国 Fluent 公司，于 2008 年收购了在电路和电磁仿真领域处于领导地位的美国 Ansoft 公司。通过整合，ANSYS 公司日渐成为全球最大的仿真软件公司。目前，ANSYS 整个产品线包括结构分析 (ANSYS Mechanical) 系列，流体动力学 (ANSYS CFD (FLUENT/CFX)) 系列，电子设计 (ANSYS Ansoft) 系列以及 ANSYS Workbench 和 EKM 等。本书以 Windows XP 32 位操作系统、ANSYS 12.0 为平台编写。

1.1.2 ANSYS 12.0 的组成

自从 ANSYS 引入 Workbench 后，ANSYS 软件产品主要由两部分构成，即 ANSYS Workbench 及经典 ANSYS (ANSYS 12.0 将其称为 ANSYS Mechanical APDL)。Workbench 是 ANSYS 公司提出的协同仿真环境，Workbench 的目的是使所有与仿真工作相关的人、技术、数据在一个统一环境中协同工作，各类数据之间的交流、通讯和共享皆可在这个环境中完成。ANSYS 12.0 的 Workbench 交互界面如图 1-1 所示。

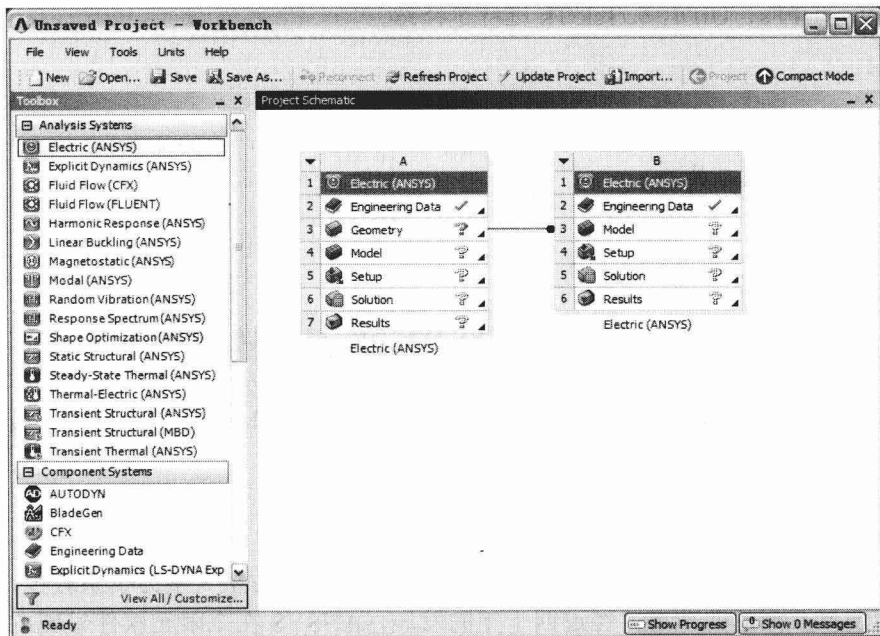


图 1-1 ANSYS 12.0 Workbench 协同仿真环境

Workbench 是一个将 ANSYS 的各个模块进行整合，并与其协同仿真环境相结合的产物。图 1-2 是 ANSYS 的各个分析模块，从图中可以发现，利用 Workbench 几乎可以直接使用 ANSYS 所有产品的前后处理器及求解器，比如 AUTODYN、BladeGen、CFX 等，此外经典 ANSYS 也是 Workbench 的一个分析模块，当然，Workbench 的强大之处不在于其对各模块的简单集成，

而是在于其先进的协同仿真环境思想。下面对图 1-2 中的各集成模块进行简单说明：



图 1-2 ANSYS 12.0 Workbench 集成的分析模块

- AUTODYN: 显式有限元分析程序, 用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题。
- BladeGen: 旋转机械叶片建模程序。
- CFX: 计算流体力学程序, 支持各种可压缩、不可压缩流体的流动分析及复杂几何体的传热分析。
- Engineering Data: 工程数据库, 用于查看、编辑、增加分析所需的材料参数。
- Explicit Dynamics (LS-DYNA Export): 通用显式动力分析程序, 适合求解结构的高速碰撞、爆炸和金属成形等非线性动力冲击问题, 也可求解传热、流体及流固耦合问题。
- Finite Element Modeler: 有限元模型生成器, 支持各种软件有限元文件的导入, 如 NASTRAN (*.bdf、*.dat、*.nas)、ABAQUS (*.inp)、Mechanical APDL (*.cdb)、CFX (*.def、*.res) 以及 Mesh 文件 (*.cndb、*.meshdat) 等。
- FLUENT: 计算流体力学程序, 支持各种可压缩、不可压缩流体的流动分析及复杂几何体的传热分析。
- Geometry: 用于导入或新建几何模型。
- Mechanical APDL: 经典 ANSYS, 在经典 ANSYS 界面内操作。
- Mechanical Model: 结构分析时用于设定材料参数、导入模型及网格划分。
- Mesh: 网格划分器。
- Results: 结果查看器。
- TurboGrid: 专业旋转机械叶片网格划分器。
- Vista TF: 旋转机械叶片设计辅助工具。

注意: 集成在 Workbench 中的各模块有些可以独立于 Workbench 运行, 如经典 ANSYS、FLUENT 等, 有些则必须通过 Workbench 才能运行。

经典 ANSYS 自 ANSYS 诞生以来界面一直未发生太大变化, 如图 1-3 所示, 虽界面简介, 但 ANSYS Mechanical APDL 功能却十分丰富。本书所谓的二次开发, 包括 APDL 的二次开发及 UPFs 的二次开发均是针对经典 ANSYS 而言的, 与 ANSYS Workbench 无关。

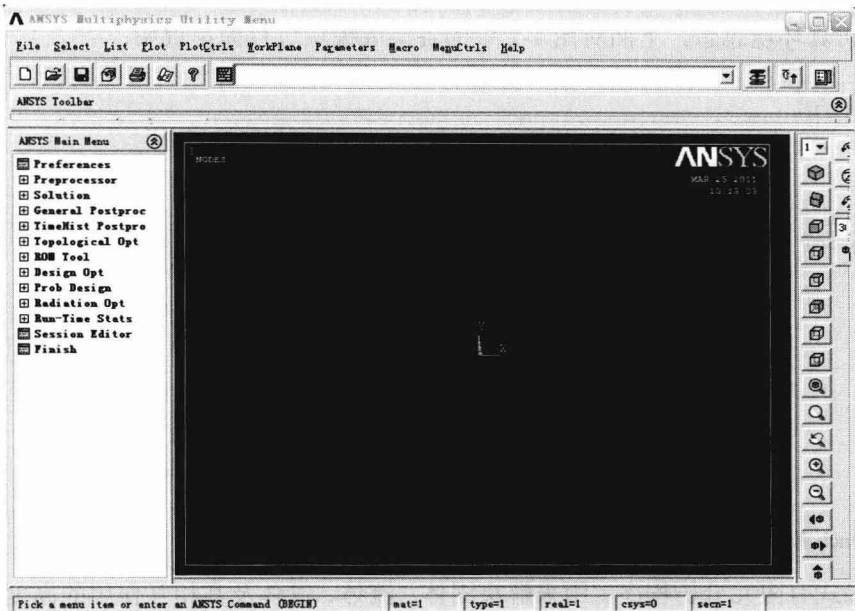


图 1-3 ANSYS 12.0 经典 ANSYS 交互界面

1.1.3 其他有限元软件

有限元是一套博大精深的科学方法，在其多年来的发展过程中诞生了许多有限元软件，除了众所周知的 ANSYS 之外，还有许多其他商业的及开源的软件，在这些有限元软件中很多都为用户提供了强大的二次开发接口，对于科研人员及工程技术人员而言，对这些软件有个大致了解是很有益处的。

1. 商业软件

(1) ABAQUS

ABAQUS 是一款功能强大的有限元软件，是世界上最著名的非线性有限元分析软件之一，是由美国达索 SIMULIA 公司（原 ABAQUS 公司）开发、维护及销售的有限元分析软件。最新版本为 2010 年推出的 ABAQUS 6.10 版，该版本推出了众多新的功能，同时也改进了以前版本的很多功能。ABAQUS 可以解决从相对简单的线性分析到极富挑战性的非线性模拟等各种问题，拥有大量不同种类的单元类型、材料模型等，它不仅能够解决结构分析（应力/位移）问题，而且能够模拟和研究包括热传导、质量扩散、电子元件器的热控制（热电耦合分析）、声学、土壤力学（渗流—应力耦合分析）和压电分析等广阔领域中。

ABAQUS 是一个协同、开放、集成的多物理场仿真平台，由各个模块组合而成。ABAQUS 的分析模块有两个：ABAQUS/Standard，即通用分析模块，可求解绝大多数线性和非线性问题；ABAQUS/Explicit，显式分析模块，用于模拟瞬态问题。ABAQUS/CAE 是 ABAQUS 的交互式图形用户界面，具有强大的前后处理能力，其中子模块 ABAQUS/Viewer 用于后处理。ABAQUS/Aqua 是专门用于模拟海岸结构的模块，ABAQUS/Design 用于设计敏感性分析。此外还有其他模块，这里不再一一介绍，感兴趣的读者可访问 ABAQUS 中国官方网站 <http://www.abaqus.com.cn/> 获得更多了解。

ABAQUS 为用户提供了 FORTRAN 子程序二次开发接口, 类似于 ANSYS 的 UPFs (见 1.2 节), 它允许用户通过子程序以 FORTRAN 代码的形式来扩展主程序的功能, 给用户提供强大而又灵活的用户子程序接口, 这些接口可使用户按照自己的要求灵活解决问题, 可大大地扩充 ABAQUS 的功能。如 UMAT 用户子程序用于在 ABAQUS/Standard 分析模块中实现用户自定义材料模型的开发, 又如 UEL 用户子程序用于开发用户自定义单元。此外, 通过 GUI 脚本可以创建新的图形用户界面和用户交互操作, 还可通过内核脚本 (Python 等语言) 实现前处理建模和后处理分析计算结果等。

(2) MSC.Nastran

Nastran 是 1966 年美国国家航空航天局 (NASA) 为了满足当时航空航天工业对结构分析的迫切需求主持开发的大型应用有限元程序, 该程序功能强大, 得到了很好的评价。1971 年 MSC 公司 (<http://www.mscsoftware.com.cn>) 对原始的 Nastran 做了大量改进, 采用了新的单元库、增强了程序的功能、改进了用户界面、提高了运算精度和效率。特别对矩阵运算方法做了重大改进, 即而推出了自己的专利版本: MSC. Nastran。此后, 又有多家公司对 Nastran 进行改进, 但占据主导地位的还是 MSC.Nastran。

MSC. Nastran 为用户提供了方便的模块化功能选项, 其主要功能模块有: 基本分析模块 (含静力、模态、屈曲、热应力、流-固耦合及数据库管理等)、动力学分析模块、热传导模块、非线性分析模块、设计灵敏度分析及优化模块、超级单元分析模块、气动弹性分析模块、高级对称分析模块以及用于二次开发的 DMAP 用户开发工具模块。

MSC. Nastran 具有开放的体系结构, 二次开发工具 DMAP 语言 (Direct Matrix Abstraction Program) 可深入 MSC.Nastran 的内核。一个 DMAP 模块可由成千上万个 FORTRAN 子程序组成, 并采用高效的矩阵处理方法。

2006 年, MSC 公司发布了 MD.Nastran, 该软件在继承了 MSC.Nastran 的基础上, 陆续集成了 Marc、Dytran、Sinda (热分析软件)、Dyna 和 Actran (声学分析软件) 等著名软件的先进技术, 大大增强了高级非线性、显式非线性、热分析、外噪声分析等功能。目前, 该软件最新版本是 MD.Nastran 2010。

(3) MSC.Marc

MSC.Marc 是 MSC 公司推出的 (1999 年 MSC 公司收购了 MARC 公司) 一款功能齐全的高度非线性有限元软件, 具有极强的结构分析能力, 能满足学术界和工业界的多种需求。其应用领域已从开发初期的核电行业迅速扩展到国防、航空、航天、汽车、造船、铁道、石油化工、能源、电子元件、机械制造、材料工程、土木工程、医疗机械、冶金工艺和家用电器等诸多领域。

MSC.Marc 的主要模块有:

- 前后处理图形对话框 MSC.Marc/Mentat;
- 高度非线性有限元软件求解器 MSC.Marc;
- Marc 并行求解器 MSC.Marc Parallel;
- 六面体自动划分模块 MSC.Marc/Hexmesh。

此外 MSC.Marc 还拥有许多其他模块, 感兴趣的读者可访问 MSC 公司官方网站。

MSC.Marc 为用户提供了友好的二次开发子程序接口, 为分析复杂问题和二次开发带来了很大的方便。MSC.Marc 为用户提供了 100 多个 FORTRAN 用户子程序接口, 这些用户子程序

接口覆盖了除求解方法外 MSC.Marc 有限元分析的所有环节。利用这些子程序可以完成以下二次开发功能：定义加载、边界条件和状态变量；定义各向异性材料特性和本构关系；定义粘塑性和广义塑性材料；定义粘弹性材料；修改几何形状及定义输出量等。此外，Marc 还提供了对图形对话框界面 MSC.Marc/Mentat 进行二次开发的工具，利用它可以定制个性化的菜单，甚至可以进行菜单的汉化。

(4) ADINA

ADINA 是由国际上著名的美国麻省理工学院 K. J. Bathe 教授领导的 ADINA R&D 公司研究开发的商用工程软件，是基于有限元技术的大型通用分析仿真平台。该软件被广泛应用于各个工业领域的工程仿真计算，包括土木建筑、交通运输、机械制造、石油化工等各个领域。ADINA 有限元程序在处理结构非线性、流固耦合方面具有强大的优势，是国际上最重要的大型非线性有限元软件之一，对线性、非线性，静力、动力，传热，计算流体动力学，流固耦合等复杂问题具有强大优势，被业内人士认为是非线性有限元发展方向的代表。1981 年 ADINA 的非商业软件进入中国市场，为有限元在我国的应用起到了很好的推动作用，不但解决了许多急需解决的工程问题，其源代码也成为国内一些科研院所进行有限元程序研究开发的基础。ADINA 最新版本为 8.6，关于 ADINA 更多介绍参见 <http://www.adina.com.cn/>。

ADINA 系统主要包括下列六个模块：

- 用户界面 ADINA-AUI (ADINA User Interface)；
- 结构分析求解器 ADINA；
- 传热分析求解器 ADINA-T；
- 计算流体动力学 (CFD) 求解器 ADINA-F；
- 流体—结构耦合分析求解器 ADINA-FSI；
- 热—机械耦合分析求解器 ADINA-TMC。

ADINA System 是一个全集成系统，所有分析模块使用统一的 ADINA 用户界面 (ADINA-AUI)。

为满足用户需要，ADINA 提供了完善的二次开发环境。ADINA 8.X 版本具有完善的用户开发环境，能对材料本构关系、单元算法、单元失效准则、结构断裂判据和裂纹扩展规律以及边界条件进行二次开发。

在有限元理论几十年的发展历程中，诞生了许多优秀的商业有限元软件，它们各具特色，各有自己稳定的用户群体。除了本节列举的商业有限元软件之外还有许多其他软件，如 CMSOL、ALGOR 等，用户如有需要可查阅相关资料。

2. 开源软件

所谓开源软件 (Open Source Softwares) 就是源代码公开，且可以被公众使用的软件，此外公众对软件的修改和发行也不受限制。比如大家熟悉的 Linux 操作系统，以及 OpenOffice 办公软件等都是典型的开源软件。在数值计算软件领域，也出现了很多以教学或研究为目的的开源软件，下面向读者介绍几个常用的有限元开源软件。

(1) FEAP

FEAP (Finite Element Analysis Program) 是美国加州大学伯克利分校土木与环境工程系 Robert L. Taylor 教授及其团队研制的通用有限元程序，研制目的是教学与科研，最新版本为 FEAP 8.3，官方网站是：<http://www.ce.berkeley.edu/projects/feap/>。该软件用 FORTRAN 语言编

写, 为开源软件, 但仍需收取较少的费用, 免费版本是 FEAPpv。

FEAP 支持众多操作系统如 Windows、Linux、UNIX 等。FEAP 拥有较快的计算速度, 软件本身带有后处理功能, 同时提供强劲的二次开发接口, FEAP 还有并行计算能力。FEAP 有完善网格划分功能, 广泛的线性、非线性求解算法, 可图形化显示网格划分并可用云图方式显示计算结果。包含众多单元类型, 如各种三维结构单元、温度单元、梁单元、平板单元及壳单元。FEAP 包括多种本构模型, 如线性及非线性弹性本构、粘弹性损伤本构模型、弹塑性模型等。

FEAPpv 是 FEAP 的个人版, FEAPpv 是免费的, 个人版可用来学习和研究有限元理论, FEAPpv 下载地址为 <http://www.ce.berkeley.edu/projects/feap/feappv/>。学习 FEAPpv 可参考 O.C. Zienkiewicz 及 Robert L. Taylor 等人的《The Finite Element Method》一书, 该书是与 FEAPpv 配套的书籍, 对于学习研究有限元理论很有帮助。

(2) deal.II

deal.II 是一款基于 C++编写的开源有限元软件, 始于德国海德堡大学数值方法小组的工作, 其编写目的是促进先进有限元程序的快速发展, deal.II 主要用于学术研究, 也被用来解决实际工程项目。学习 deal.II 需要有 C++语言基础及较完善的有限元理论知识, 最新版本为 deal.II 7.0, 可到其官网下载: <http://www.dealii.org/>。deal.II 有如下特点:

- 具有统一的二次开发接口;
- 超强的自适应网格划分功能, 并可进行局部网格细分;
- 支持各种单元, 如各阶拉格朗日单元, 连续、非连续单元, 各阶 Nedelec 单元及 Raviart-Thomas 单元等;
- 完善的软件说明文档;
- 软件数据组织及算法结构清晰;
- 支持数种标准输出格式, 以方便进行后处理;
- 支持并行处理器, 支持多种操作系统。

(3) libMesh

libMesh 是美国德克萨斯大学奥斯汀分校于 2002 年开始开发的用于求解偏微分方程的程序库, libMesh 有些方面类似于 deal.II, 比如同样基于 C++编写, 同样支持并行处理器, 同样擅长于自适应网格划分等, 其官方网站为: <http://libmesh.sourceforge.net/>。

libMesh 支持各种常用单元, 支持稳态及瞬态仿真分析。LibMesh 使用了许多已有的优秀的程序库, 如用支持并行计算的 PETSc 来求解线性方程组, 利用 SLEPc 程序库来解决特征值问题等。libMesh 程序库提供的组件包括: 各种通用 2D、3D 单元, 稀疏矩阵求解器, 网格划分器, 网格文件转换(支持输出各种格式网格文件)等。

(4) OpenSees

OpenSees 的全称是 Open System for Earthquake Engineering Simulation(地震工程模拟开放体系), 官网地址为 <http://opensees.berkeley.edu/>。它是由加州大学伯克利分校于 1999 年推出的用于结构和岩土地震反应模拟的开源软件。OpenSees 广泛用于太平洋地震工程研究中心和美国其他一些大学和科研机构的科研项目中, 较好地模拟了包括钢筋混凝土结构、桥梁、岩土工程在内众多的实际工程和振动台试验项目, 证明其有较好的非线性数值模拟精度。OpenSees 可以实现的分析过程包括:

- 静力线弹性分析;
- 静力非线性分析;
- 模态分析;
- pushover 拟动力分析;
- 动力线弹性分析;
- 动力非线性分析;
- 地震作用下的可靠度及灵敏度的分析。

由于 OpenSees 是开源软件, 故自从 1999 年推出以来, 该软件不断进行升级和提高, 加入了许多新的材料和单元, 引入了许多业已成熟的 FORTRAN 库文件为己所用 (如 FEAP、FEDEAS 材料), 更新了高效实用的运算法则和判敛准则, 允许多点输入地震波纪录, 并不断提高运算中的内存管理水平和计算效率, 允许用户在脚本层面上对分析进行更多控制。此外, OpenSees 支持并行运算。正式基于 OpenSees 的以上特点, 近年来国内对 OpenSees 的研究使用逐年增加。

除了以上提及的软件外, 还有许多其他值得研究的开源软件, 例如 OpenFEM、FEDEAS、FFEP 等, 感兴趣的读者可查阅相关文件。

1.2 ANSYS 二次开发工具

用于 ANSYS 二次开发的工具主要有 4 个, 即 APDL、UPFs、UIDL 及 Tcl/Tk。使用以上工具可以建立新的材料模型 (非线性弹性、弹塑性、粘弹塑性、蠕变、超弹性等各种材料模型), 构建新的单元类型, 定义摩擦准则, 参数化建模, 优化分析, 构建流程化的 ANSYS 分析平台, 建立符合用户专业需求的 ANSYS 用户界面等。

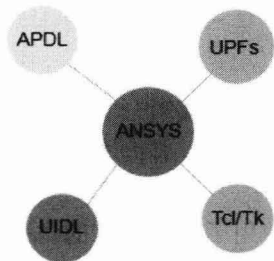


图 1-4 ANSYS 二次开发工具

APDL (ANSYS Parametric Design Language) ——ANSYS 参数化设计语言, 即通常所说的命令流; UPFs (User Programmable Features) ——用户可编程特性, 操作途径是对 ANSYS 核心 FORTRAN 代码进行修改, 对开发者有限元知识水平要求较高; UIDL (User Interface Design Language) ——用户界面设计语言; Tcl (Tool command language) ——工具命令语言, Tk 是基于 Tcl 的图形开发工具箱, 二者用于 ANSYS 界面开发, 比 UIDL 更加接近底层。

本节对这四种开发工具进行简单介绍, 由于本书重点是 APDL 及 UPFs, 故对于 UIDL 及 Tcl/Tk 本节给出简单应用实例, 本书其他部分不再介绍。

1.2.1 APDL 参数化设计语言

对于一些重复的结构分析，例如对模型的某一参数进行了修改，此时若全部重新建模、划分网格、加载、后处理，则需要很大的工作量。APDL 就是为解决这类问题而设计的，它是用来自动完成某些功能或建模的语言，使用非常方便，利用它对 ANSYS 进行二次开发可以极大地提高分析效率。

APDL 是 ANSYS Parametric Design Language 的简称，即 ANSYS 参数化设计语言，由类似于 FORTRAN 的语言部分和 1000 多条 ANSYS 命令组成。APDL 是一种解释性文本语言，有顺序、选择、循环及宏等结构。利用 APDL 将 ANSYS 命令组织起来，编写出参数化的用户程序，从而实现有限元分析的全过程，即建立参数化的实体模型、参数化的网格划分与控制、参数化的材料定义、参数化的载荷和边界条件定义、参数化的分析控制和求解以及参数化的后处理。本书第 2 章将对 APDL 基本知识进行介绍。

1.2.2 UPFs 用户可编程特性

UPFs 是 User Programmable Features（用户可编程特性）的简称，用户可以根据需要利用 UPFs 重新编译连接生成用户定制版本的 ANSYS 软件，例如创建新单元、定义新的材料属性、定义用户失效准则等，用户还可以编写自己的优化设计算法，甚至可以将整个 ANSYS 程序作为子程序调用。UPFs 是用户在 ANSYS 提供的 FORTRAN 源代码的基础上，修改其用户可编程子程序和函数（称为用户子程序），从源代码层次上对 ANSYS 进行二次开发的工具。用户需要在相应的 FORTRAN 语言编译器（ANSYS 同样支持非 FORTRAN 语言的编译器，如 C 语言，但需要 FORTRAN 语言外壳，且需要格外小心，不建议这种方式）的支持下，将编译修改后的源代码与 ANSYS 库相连形成用户版本的 ANSYS 可执行文件，另外还可以创建自己的外部命令。以下 ANSYS 产品支持 UPFs：

- ANSYS Multiphysics
- ANSYS Mechanical
- ANSYS Structural
- ANSYS Emag-Low Frequency
- ANSYS Emag-High Frequency
- ANSYS PrepPost

本书以 ANSYS 12.0 为例介绍。在安装 ANSYS 12.0 时，ANSYS 默认不安装 UPFs 二次开发相关文件，如图 1-5 所示，需要用户点选“ANSYS Customization Files”选项才能利用 UPFs 进行 ANSYS 二次开发，有些其他版本的 ANSYS 默认情况下也是不安装这些文件的，需要读者注意。

安装好后，ANSYS 12.0 会将相关的用于二次开发的 FORTRAN 文件存放在 \Ansys Inc\120\ansys\customize\user 路径下，如图 1-6 所示，用户可从中找到需要的用户子程序对其进行修改，然后编译连接（详见 3.5 节）即可生成用户自定义版本的 ANSYS。用户可以同时编译多个不同的用户子程序，当然，编译的用户子程序越多，花费的时间也就越长。