

SHUZHI FENXI ZAI SHUILI SHUIDIAN
GONGCHENG ZHONG DE YINGYONG

数值分析

在水利水电工程中的应用

梁春雨 安超 王李平 杜少磊 游慧杰 著
庞瑞 张鹏 程莹莹 徐凌 顾康辉



黄河水利出版社

数值分析在水利水电工程中的应用

梁春雨 安超 王李平 杜少磊 游慧杰 著
庞瑞 张鹏 程莹莹 徐凌 顾康辉



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内容提要

本书主要介绍了数值分析方法在水利水电工程中的应用情况,内容由 ANSYS 软件使用方法和工程实例两部分组成。软件使用方法包括 ANSYS 入门操作、网格划分、路径技术;工程实例应用包括挡土墙、水闸、堤防、边坡、重力坝、渡槽的静力分析与动力分析。

本书可作为专业工程技术人员设计分析的参考书,也可作为高等学校水利工程、土木工程、岩土工程相关专业本科生与研究生的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

数值分析在水利水电工程中的应用/梁春雨等著. —郑州:
黄河水利出版社,2017.6

ISBN 978-7-5509-1776-7

I. ①数… II. ①梁… III. ①数值分析-应用-水利-
水电工程-研究 IV. ①TV②0241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 138184 号

组稿编辑:贾会珍 电话:0371-66028027 E-mail:110885539@qq.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:17

字数:393 千字

印数:1—1 000

版次:2017 年 6 月第 1 版

印次:2017 年 6 月第 1 次印刷

定价:48.00 元

前 言

水是生命之源、生产之要、生态之基,水利是经济社会发展的基本条件、基础支撑、重要保障,兴水利、除水害历来是治国安邦的大事。在“十二五”期间,我国水利建设完成投资超过 2 万亿元,再创历史新高,其中 172 项节水供水重大水利工程建设加快推进,投资规模超过 8 000 亿元。水利工程除具备一般土建工程特点外,还具备工程量大、投资多、工期长、工作条件复杂、施工难度大、效益大、失事后果严重等特点。随着水利水电工程的大型化、地形地质条件的复杂化,水利水电工程的建设难度愈来愈大,这就需要对水利水电工程进行更为精确的分析,当前水利工程问题的常用解决方法主要有理论分析、数值分析、试验研究、原型观测与监测、工程经验。随着计算机科技的发展,数值分析的应用领域和范围在迅猛扩大,目前数值分析已是各种方法中的佼佼者。它将虚拟与现实结合起来,精准地模拟建筑物的工作性状,为设计、施工、管理提供基础支撑。当前,用于数值分析的方法有有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、离散元法(DEM)等。水利工程中应用最广泛的数值分析方法是有限元法与有限差分法,这两种方法代表软件分别是 ANSYS 和 Flac^{3d}。本书针对水利工程结构与岩土相融合的特性,将水利工程中有代表性的建筑物从结构和岩土两个方面,分别进行数值仿真应用经验的介绍。

ANSYS 软件是国际流行的大型通用商业有限元分析软件,它功能强大,集结构、流体、电磁等多物理场于一体。水利工程中主要用到它的结构模块,可以模拟钢筋混凝土和钢结构在水荷载、温度荷载、地震荷载、设备荷载下结构的应力应变,应力积分求内力,可分别应用于正常使用极限状态和承载能力极限状态的结构设计。版权所有 ANSYS 公司于 1970 年在美国成立,总部位于宾西法尼亚州的匹兹堡市。

本书共分 14 章,第 1 章与第 2 章是入门基础,重点介绍了 ANSYS 软件应用环境和前处理技术;第 3 章介绍了数值积分技术在后处理中的使用方法与技巧;第 4~14 章以水利工程专业为主,详尽阐述了水工建筑物结构稳定分析、线性静力分析、结构非线性分析、结构动力分析等方面的内容和实践经验。本书的一大特色是从工程师的视角、数值分析的手段来解决工程问题,并配有大量计算流程和命令流原始资料。

数值模拟是一门艺术,它集工程经验、专业理论、计算素养于一体。作为工程技术人员,我们既要敬畏数值模拟,也要勇于实践,假以时日,必水到渠成。

本书是综合甲级设计院的资深工程师团队应用经验的总结,书中案例均为工程实例,分析内容丰富多彩;结构稳定分析、结构应力应变分析、结构配筋计算等设计领域全方位覆盖;建筑物多样化:既涵盖水利工程中堤防、大坝、水闸、隧洞等主要建筑物,又囊括边坡、桩基础等次要建筑物。

本书第1~3章及第13章由梁春雨、安超撰写,第4~6章及第11章由王李平、杜少磊撰写,第7章、第8章由游慧杰、庞瑞撰写,第9章、第10章由张鹏、程莹莹撰写,第12章、第14章由徐凌、顾康辉撰写。

由于时间仓促,作者水平有限,书中错误、纰漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作 者

2017年3月

目 录

前 言

第 1 章	ANSYS 入门	(1)
1.1	ANSYS 软件简介	(1)
1.2	ANSYS 环境介绍	(1)
1.3	程序架构	(6)
1.4	数据文件	(7)
1.5	命令流语法	(8)
1.6	单元类型	(10)
第 2 章	网格划分	(15)
2.1	自主网格	(15)
2.2	外部网格	(18)
2.3	网格技巧	(20)
2.4	单元蜕变规律	(23)
2.5	网格划分原则	(24)
第 3 章	路径技术	(27)
3.1	弹性应力配筋的方法	(28)
3.2	弹性应力——总拉力	(29)
3.3	弹性应力图形内力	(29)
3.4	应用实例	(30)
3.5	路径技术总结	(37)
第 4 章	挡土墙	(38)
4.1	挡土墙数值过程	(38)
4.2	数据处理分析	(42)
第 5 章	水 闸	(46)
5.1	工程概况	(47)
5.2	有限元模型	(48)
5.3	程序编制	(48)
5.4	成果及分析	(52)
第 6 章	渠道护坡	(57)
6.1	齿脚型式比选	(57)
6.2	分缝位置分析	(73)
第 7 章	动力时间历程响应分析在建筑物抗震分析中的应用	(82)
7.1	概 述	(82)

7.2	计算分析步骤	(83)
7.3	关键技术问题	(87)
7.4	工程实例	(90)
第8章	有限元强度折减法在边坡稳定性分析中的应用	(104)
8.1	概 述	(104)
8.2	关键技术问题	(104)
8.3	工程实例	(106)
第9章	碾压混凝土重力坝和进水口结构静力分析	(125)
9.1	概 述	(125)
9.2	关键技术问题	(125)
9.3	工程实例	(128)
第10章	水工地下结构初始地应力场模拟	(155)
10.1	工程概况	(155)
10.2	关键技术问题	(155)
10.3	有限元建立	(156)
10.4	初始地应力生成、施加及检验	(164)
10.5	后处理	(168)
10.6	高级应用	(169)
第11章	反应谱法在水工建筑物抗震分析中的应用	(174)
11.1	反应谱的概念	(174)
11.2	反应谱的建立	(174)
11.3	谱分析涉及的几个术语	(174)
11.4	数据仿真基本步骤	(175)
11.5	动水-结构相互作用	(175)
11.6	反应谱处理	(176)
11.7	工程实例	(177)
第12章	地下构筑物支护结构分析应用	(187)
12.1	力学模型	(187)
12.2	弹性地基理论	(187)
12.3	ANSYS 弹性地基程序设计	(187)
12.4	理论解与数值解对比	(188)
12.5	马蹄形隧洞断面计算实例	(192)
12.6	相关命令流	(195)
第13章	泵闸结构分析应用	(200)
13.1	工程背景	(200)
13.2	水 文	(201)
13.3	工程地质	(202)
13.4	工程任务和规模	(208)

13.5	水闸、泵站结构设计	(215)
第 14 章	大型渡槽在抗震分析中的应用	(229)
14.1	背景与意义	(229)
14.2	结构抗震计算的基本理论	(230)
14.3	考虑流 - 固耦合作用与直接建模分析	(237)
14.4	基于 ANSYS 程序的水工建筑物抗震分析	(241)
14.5	计算实例	(252)

第 1 章 ANSYS 入门

1.1 ANSYS 软件简介

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件,是世界范围内增长速度最快的计算机辅助工程 (CAE) 软件,能与多数计算机辅助设计 (CAD) 软件接口,实现数据的共享和交换,如 Creo、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD 等。ANSYS 软件是融结构、热、流体、电磁、声学于一体的大型通用有限元软件,可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、生物医学、水利、日用家电等一般工业及科学研究。该软件提供了不断改进的功能清单,具体包括:结构高度非线性分析、电磁分析、计算流体力学分析、设计优化、接触分析、自适应网格划分及利用 ANSYS 参数设计语言扩展宏命令功能。ANSYS 功能强大,操作简单方便,现在已成为国际最流行的有限元分析软件,在历年的有限元分析软件评比中都名列第一。目前,我国有 100 多所理工院校采用 ANSYS 软件进行有限元分析或者作为标准教学软件。

1.2 ANSYS 环境介绍

ANSYS 有两种执行模式:一种是交互模式 (Interactive Mode),另一种是非交互模式 (Batch Mode)。交互模式是初学者和大多数使用者所采用的,包括建模、保存文件、打印图形及结果分析等,一般无特别原因皆用交互模式。但若分析的问题需要很长时间,如一两天等,可把分析问题的命令做成文件,利用它的非交互模式进行分析。

在交互模式下,ANSYS 有两种输入方式:GUI (Graphical User Interface) 方式和命令流方式。

1.2.1 GUI 方式

在启动 ANSYS 后,首先进入工作目录和工件文件名设置界面,用户设置工作路径后,将进入 ANSYS 软件的图形用户界面,该界面主要由 8 个部分组成,整个窗口系统称为 GUI,如图 1-1 所示;8 个窗体部件,提供使用者与软件之间的交流,凭借这 8 个窗体部件可以非常容易地输入命令、检查模型的建立、观察分析结果及图形输出与打印。

1.2.1.1 实用菜单 (Utility Menu)

同许多应用程序用户界面一样,单击下拉菜单弹出下一级菜单选项,由此进入 ANSYS 不同的功能模块。实用菜单由 10 个下拉菜单组成,包括文件菜单、选择菜单、列表菜单、显示菜单、显示控制菜单、工作平面菜单、参数设置菜单、宏操作菜单、控制菜单和帮助菜单。水利工程中最常用的是前 6 个菜单。



图 1-1 ANSYS 软件主窗口

➤ File 菜单,如图 1-2 所示

File 菜单有 8 项功能分区,主要包括文件命名、读取、存储、命令流文件读入,几何模型导入等,Read Input From 选项非常有用,读入命令流文本文件,代替在命令窗口一条一条输入命令,有时候一些命令不能通过 ANSYS 命令输入窗口进行执行,必须以这种方式读入。

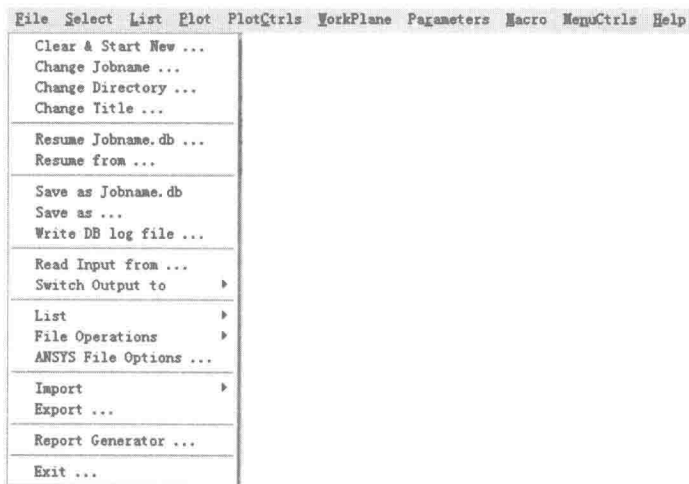


图 1-2 文件菜单

➤ Select 菜单,如图 1-3 所示。

选择操作在 ANSYS 中非常强大,从几何元素到有限元元素,每一个实体对象都可选中,进行后续操作。选择方式多种多样,几乎用户能想到的,ANSYS 都能实现,如利用几

何拓扑家族基因进行“关联”选择,表明出强大的技术革命性。

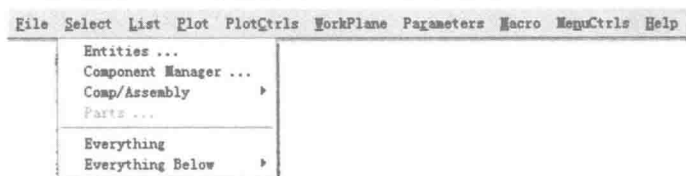


图 1-3 选择菜单

➤ List 菜单,如图 1-4 所示。

以表单形式提供当前数据库中所含有的所有类型的数据信息,便于用户验证操作的真伪。

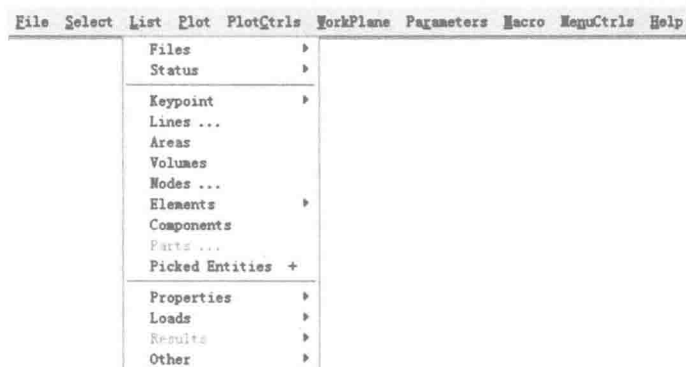


图 1-4 列表菜单

➤ Plot 菜单,如图 1-5 所示。

控制图形窗口中显示的对象,如关键点、线、面、体、节点、单元以及其他各种能以图形方式显示的数据。

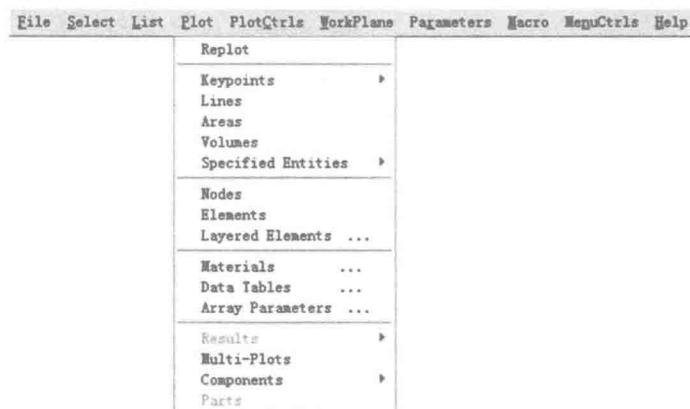


图 1-5 显示菜单

➤ PlotCtrls 菜单,如图 1-6 所示。

设置图形窗口中对象以哪种风格进行显示,如对象空间的姿态;控制窗口显示的对象

类型,如窗口背景色、时间、ANSYS 图标、后处理中的图例等;还可以将图形窗口中对象以图片的形式输出备用。

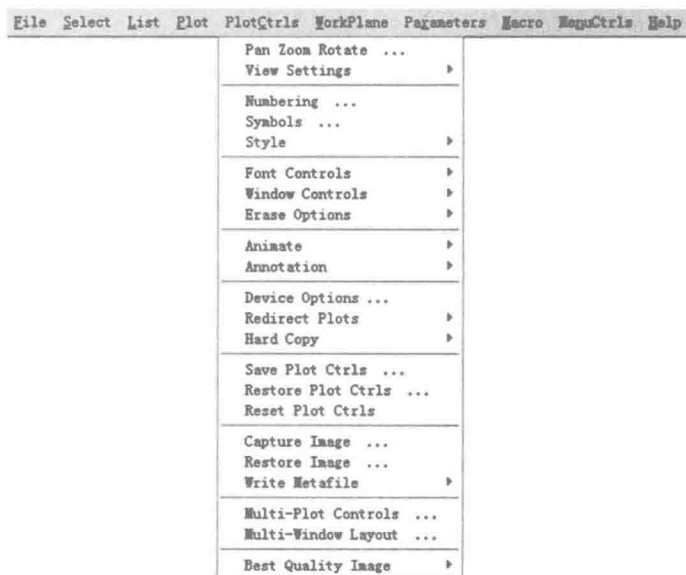


图 1-6 显示控制菜单

► WorkPlane 菜单,如图 1-7 所示。

工作平面是二维与三维联系的纽带,像 AutoCAD 中的 UCS 和 Catia 中的工作平面一样。它在前后处理中扮演重要角色。WorkPlane 菜单中包含了它的生成方法。

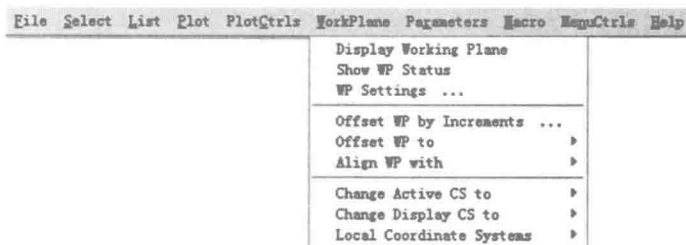


图 1-7 工作平面菜单

1.2.1.2 标准工具栏 (Standard Toolbar)

将一些常用的命令按钮集成于此,使方便快捷操作成为可能。

1.2.1.3 命令输入窗口 (Command Window)

ANSYS 软件有两种操作方式:GUI 操作和命令流操作。该窗口可输入各种命令,在输入命令的同时,将会出现浮动提示栏,智能化提示命令的输入格式。

1.2.1.4 ANSYS 工具条

允许用户自定义一些按钮来执行一些 ANSYS 命令或者函数,可在 Utility Menu > MenuCtrls > Edit Toolbar 下根据个人喜好自行编辑。ANSYS 预装了一些按钮来执行相应的功能。

1.2.1.5 主菜单

顾名思义,其他菜单都是它的补充。主菜单涵盖了 ANSYS 分析过程的所有菜单命令,按其分析的顺序进行排列,包括前处理、求解器、通用后处理、时间历程后处理和优化设计等。

1.2.1.6 图形窗口

显示用户建立的模型和计算结果。

1.2.1.7 视图操控工具条

控制图形窗口模型的显示方式,包括各种侧面图、旋转模型、移动模型等操作。

1.2.1.8 状态栏

显示当前操作的有关提示,以及材料号、单元号、实常数号等信息。

1.2.1.9 输出窗口

在 ANSYS 启动后,在主窗口的后面还有一个隐藏的输出窗口,黑色背景,与 DOS 界面相仿,如图 1-8 所示,它的作用是显示对用户操作指令的反馈信息。

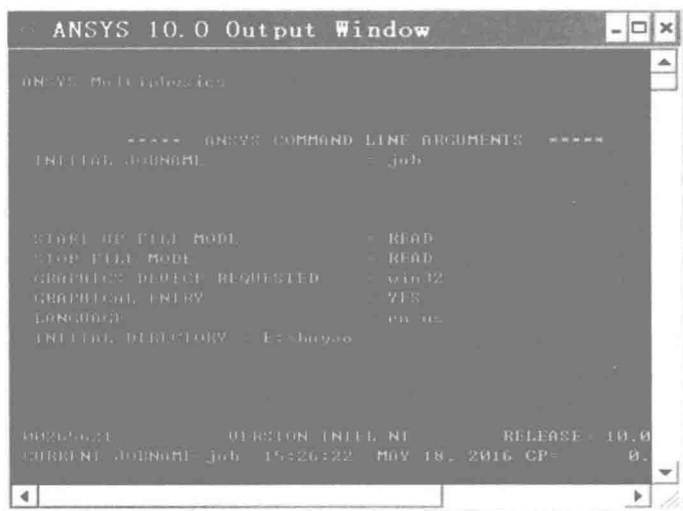


图 1-8 ANSYS 输出窗口

1.2.2 命令流方式

ANSYS 的命令流方式如图 1-9 所示,将二次开发工具 APDL、UPFS、UIDL 和 TCL/TK 深度融合,编写程序命令流于一个文本中,再通过 /input 命令读入并执行,也可通过拷贝该文本内容粘贴到命令行中执行。

命令流方式与 GUI 方式共存,满足不同使用者的需求,为软件功能向使用者专业领域拓展,供了可能性,如利用 UPFS 开发邓肯-张和摩尔库仑岩土本构模型,极大地拓展了 ANSYS 在岩土中的应用;也为不同用户间进行交流提供快捷途径,如利用 APDL 进行交流、发布;同

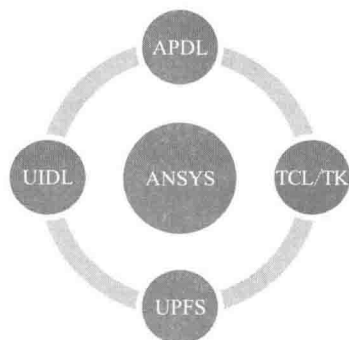


图 1-9 ANSYS 二次开发工具

时为设计人与校核人按照企业质量体系文件进行的设计、校核、审查、审核、审定工作提供方便。

因此,有人将 ANSYS 视为一个学科进行研究。在现有的众多有限元软件中,ANSYS 也因此项绝技而独树一帜。因此,强烈推荐使用命令流方式进行操作!

1.3 程序架构

ANSYS 构架分为两层,一是起始层(Begin Level),二是处理层(Processor Level),拉开输入命令窗口可以看到目前在哪个层级,如图 1-10 所示。这两个层的关系主要是使用命令输入时,要通过起始层进入不同的处理器。处理器视为解决问题步骤中的组合命令,通常一个命令必须在其所属的处理器下执行,否则会出现错误,但有的命令可以在多个处理器下执行,如选择类命令。ANSYS 解决问题的基本流程叙述如下:

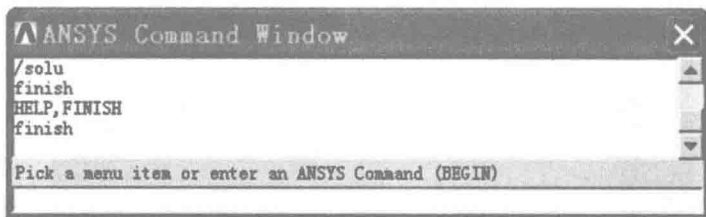


图 1-10 命令窗口中层级结构

➤ 前置处理 (General Preprocessor, PREP7)

建立几何模型、划分网格,为后续分析提供有限元模型。不管哪种分析都一定使用该处理器。

➤ 求解处理器 (Solution Processor, SOLU)

定义外力、边界条件、求解。

➤ 一般后处理器 (General Postprocessor)

用于静态结构分析、模态分析、屈曲分析后检查结果。

➤ 时域后处理器 (Time Domain Postprocessor, POST26)

用于动态分析后,查看动态分析与时间有关的时域结果。

➤ 优化处理器 (Optimization Processor, OPT)

处理最佳优化问题,定义目标函数,限制函数。

水利工程中最常用的是静态结构分析与动态分析相关处理器:PREP7、SOLU、POST1、POST26。如图 1-11 所示:由 Begin Level 进入处理器,直接输入斜杠符号加处理器名称,如 `/PREP7`、`/SOLU`、`/POST1`。处理器之间的转换通过命令 `FINISH` 先回到 Begin Level,然后进入目标处理器。

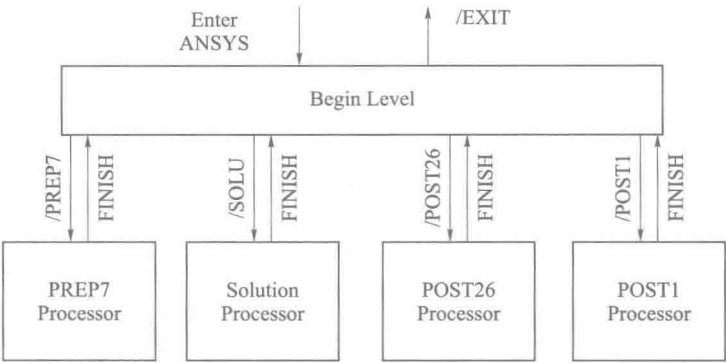


图 1-11 程序架构图

1.4 数据文件

进行有限元分析过程中,程序会自动创建大量文件,分门别类地保存各种有用的信息,常用的重要文件如表 1-1 所示。

表 1-1 常用数据文件汇总

文件名称	类型	说明
Jobname. log	文本	日志文件
Jobname. err	文本	错误及警告信息文件
Jobname. db	二进制	数据库文件
Jobname. out	文本	输出文件
Jobname. rst	二进制	结构和耦合场分析的结果文件
Jobname. rth	二进制	温度分析的结果文件

• Log file

该文件为 ASCII 文件,记录使用者从进入至离开期间,所执行的任何正确与错误的命令,使用者可利用文件软件编辑该文件,删除不必要的命令,修正错误的命令,保留该文件以便日后参考或重新分析。这点对于初学者非常有用:将该文件编辑,变成自己的命令流文件。

• Error file

该文件记录执行命令时所产生的错误信息,它与上面的 Log file 区别在于,Log file 是记录操作者的操作痕迹,Error file 是记录平台对错误操作的提醒。如在有限元模型下,执行 solve 求解时,会出现“*There are no nodes defined*”警告信息。

• Output file

该文件记录使用者执行每一条命令后的执行情况,不管该命令是否正确,在 GUI 模式下,等同于输出窗口显示的内容。

- Database file

该文件记录有限元系统的资料,包括 Node、Element、load、Result 等所有支持的对象的数据信息。

- Result file

该文件保存有限元模块分析完成后的结果,当结构正确无误分析完成后,便会生成该文件,不同专业方向分析生成的结果文件扩展名也不一样,如表 1-1 所示。

1.5 命令流语法

命令流可由 UPFS、APDL 等完成,水利工程中应用最多的是 APDL,APDL 编写命令流应用简单方便,利用它可以完成绝大多数的任务,深受广大用户喜爱;UPFS 是高级二次开发,可以创建新单元、定义新的材料属性、定义用户失效准则等,是从源代码层次上对 ANSYS 进行二次开发。本书仅介绍 APDL 的应用情况。

ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 是一种脚本语言,用户可用它自动分析任务,甚至创建参数化有限元模型。所有的 ANSYS 命令可以作为脚本使用,作为纯脚本语言,它还包含大量其他特征,如重复命令、宏操作、条件语句、循环结构、标量、矢量和矩阵运算。同时,APDL 是一些复杂应用的基础,如在优化设计和自适应网格剖分应用方面,也为用户日常应用提供便利。

APDL 书写格式与一般的 FORTRAN 程序语法相似,由 1 000 多条 ANSYS 命令和 FORTRAN 语言部分组成,现在举例说明。

命题内容:两端固结梁,截面尺寸如图 1-12 所示,承受均布荷载 20 kN/m ,分析它的受力情况。

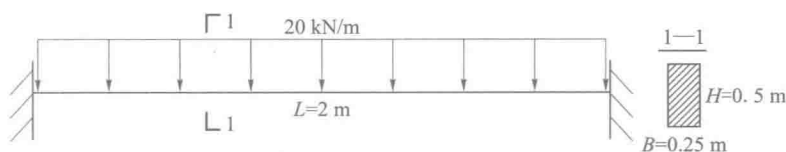


图 1-12 固结梁几何模型

FINISH	
/CLEAR	! 清除目前 ANSYS 中所有数据
/FILNAM, BEAM_2D	! 定义工作名
/TITLE, INTERNAL FORCE IN BEAM	! 定义分析标题
/PREP7	! 进入前处理模块
B = 0.25	! 梁宽
H = 0.5	! 梁高
ET, 1, BEAM3	! 定义热分析单元
MP, EX, 1, 2.1E11	! 弹性模量

MP,PRXY,1,0.3	! 泊松比
R,1,B * H,B * H * H * H/12,H	! 截面参数
K,1,0,0,0	! 定义关键点
K,2,1,0,0	
K,3,2,0,0	
/PNUM,KP,1	! 打开关键点编号显示
L,1,2	! 定义直线
L,2,3	
LATT,1,1,1,,,,	! 设置网格划分时单元属性
LESIZE,ALL,,,10,,,1,	! 设置网格划分尺寸
LSEL,S,,,1,30	! 选择被划分的直线
LMESH,ALL	! 直线网格划分
ALLSEL	! 选择所有模型
/PNUM,KP,0	! 关闭关键点编号显示
/PNUM,NODE,1	! 打开节点编号显示
D,1,ALL	! 约束节点 1 的所有自由度
D,12,ALL	! 约束节点 12 的所有自由度
ESEL,S,,,1,20	
SFBEAM,ALL,1,PRES,20000,20000,,,,	! 给单元施加均布荷载
/SOL	! 进入求解器
ANTYPE,0	! 设置单元类型
SOLVE	! 进行求解
FINISH	! 完成分析退出求解器
/POST1	! 进入后处理
SET, LAST	! 激活最后一个荷载步
ETABLE,FXI,SMISC,1	! 定义单元节点 I 处的轴力结果列表
ETABLE,FYI,SMISC,2	! 定义单元节点 I 处的剪力结果列表
ETABLE,MI,SMISC,6	! 定义单元节点 I 处的弯矩结果列表
ETABLE,FXJ,SMISC,7	! 定义单元节点 J 处的轴力结果列表
ETABLE,FYJ,SMISC,8	! 定义单元节点 J 处的剪力结果列表
ETABLE,MJ,SMISC,12	! 定义单元节点 J 处的弯矩结果列表
PLLS,MI,MJ,1,0	! 显示单元的弯矩图
! PLLS,FXI,FXJ,1,0	! 显示单元的轴力图
PLLS,FYI,FYJ,1,0	! 显示单元的剪力图

梁弯矩、剪力图分别见图 1-13、图 1-14。