

第二章 ANSYS 7.0 分析基础

本章要点:

- I 有限元分析基础知识
- I ANSYS 有限元分析的基本过程
- I ANSYS 分析的各主要步骤的详细信息

学习 ANSYS 就必须首先了解有限元分析的基础知识, 了解有限元分析的大致过程及有限元分析在 ANSYS 中实现的主要步骤。本章首先介绍有限元分析的基本概念, 然后展开介绍 ANSYS 分析的主要步骤及每个主要步骤中需要注意的事项。首先从有限元基本概念开始介绍。

2.1 有限元分析的基本概念

有限元分析是随着计算机技术的发展而迅速发展起来的一种现代数值分析方法。它是 50 年代首先在连续力学领域-飞机结构静、动态特性分析中应用的一种非常有效的数值分析方法, 随后很快就广泛的应用于热传导、电磁场、流体力学等连续性问题求解。

图 2-1 和图 2-2 是用有限元法对三维实梁的切片进行的变形和应力分析, 其中图 2-1 是切片的有限元模型, 图 2-2 是切片的等效应力等值线图。在图 2-1 中采用 8 节点体单元将梁切片划分成为网格, 这些网格习惯上称为单元。网格间相互连接的交点成为节点。网格和网格的交线称为边界。从图 2-1 上可知, 模型上节点总数是有限的, 单元数(网格数)也是有限的, 因此成为“有限元法”。这就是“有限元”一词的由来。有限元法分析的思路和作法可以归纳为以下几点:

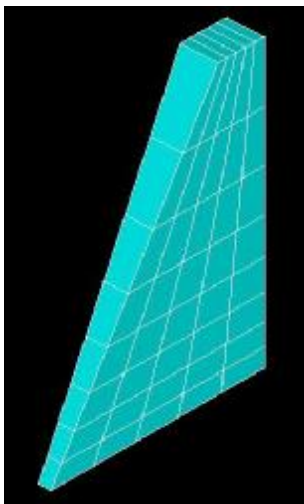


图 2-1 有限元模型

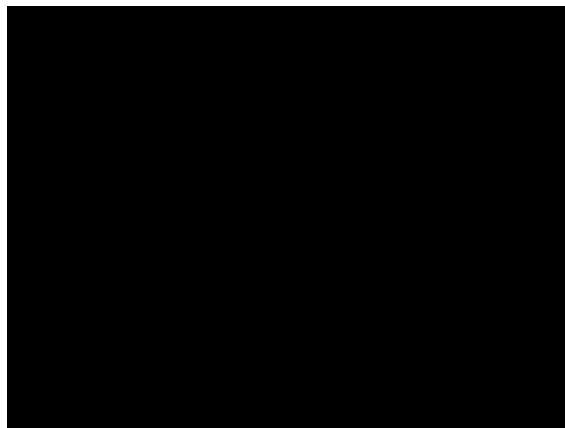


图 2-2 等效应力等值线图

1. 物理模型离散化（划分网格）

将需要分析的物理模型离散为由各种单元组成的计算模型，如图 2-1 所示，这一步称为单元离散，通俗的说法就是将模型划分为网格。离散后单元与单元之间利用单元的节点相互连接起来；单元节点的设置、性质、数据等应该视问题的性质、所需描述的状态的需要和计算精度而定（一般情况，单元划分越细密则描述应力分布越精确，即越接近实际应力分布，但是所需计算时间越多）。所以有限元分析中的结构已经不是原来的物体或结构物，而是具有同样材料的由众多单元以一定方式连接成的离散物体。因此，通过有限元分析得到的结果必然是近似的，如果划分的单元细密而且合理，则获得的结果会无限接近实际情况，满足过程分析精度的要求。

2. 定义单元特性

1. 选择位移模式

在有限元分析中，选择节点位移作为基本未知量时成为位移法；选择节点力为基本未知量时称为力法；取一部分节点力和一部分节点位移作为基本未知量时成为混和法。位移由于容易实现数值计算，所以在有限元分析中位移法应用最广。

当采用位移法时，物体或结构离散化后，就可以将单元中的一些物理量如位移、应变和应力等由节点位移表示。这时可以对单元位移的分别采用一些能逼近原函数的近似函数进行描述。有限元分析中将位移表示为坐标变量的简单函数，也就是常说的位移函数。

2. 定义单元的力学形状

根据单元的材料形状、形状、尺寸、节点数目、位置等等参数，找出单元节点力和节点位移的关系式，这时单元分析中的关键一步。此时需要应用弹性力学中的几何方程和物理方程来建立力和位移的方程，导出单元刚度矩阵，这是有限元分析的一个基本步骤。

3. 计算等效节点力

物理模型离散化后，假定力是通过节点在单元间进行传递，但是，对于实际连续体，力是通过单元的公共界面在单元间进行传递。因此，所有作用在单元边界上的表面力、体积力或者集中力都需要等效的转移到节点上，即用等效的节点力来代替所有作用在单元上的力。

3. 组装单元

利用结构中力的平衡条件和边界条件将各个单元按照原来的结构重新连接起来，形成整体有限元方程：

$$Kq=f$$

式中， K 是整体刚度矩阵； q 是节点位移矩阵； f 是载荷矩阵。

4. 求解未知节点位移

解有限元方程 $Kq=f$ 得到位移。这里，需要根据方程组的具体特点来选择合适的计算方法。

通过上述分析，可以了解，有限元分析的基本思路是“先离散再组装”，离散为了进行单元分析，组装为了对整体结构进行分析。

2.2 ANSYS 分析典型过程

了解了有限元分析的基本概念，下面介绍 ANSYS 典型的分析过程。有限元分析是对物理现象（几何变形及载荷状况）的模拟，是对真实情况的数值近似模拟。通过对分析对象划分网格，求解有限个数值参量模拟真实环境的无限个未知量。

2.2.1 ANSYS 分析典型过程

ANSYS 分析过程中包含三个主要步骤：

1. 建立有限元模型

- (1) 建立或导入几何模型
- (2) 定义材料属性
- (3) 划分网格建立有限元模型

2. 施加载荷并求解

- (1) 定义约束
- (2) 施加载荷
- (3) 设置分析选项并求解

3. 查看分析结果

- (1) 查看分析结果
- (2) 检验分析结果（验证结果是否正确）

2.2.2 ANSYS 数据库

ANSYS 的数据库指在前处理、求解及后处理过程中 ANSYS 保存在内存中的数据。数据库既存储输入数据，如模型几何参数、材料属性及载荷状况等；又存储结果数据，如 ANSYS

分析得到的应力、应变、位移、温度场等。下面介绍常用的 ANSYS 数据库操作：

1. 存储数据库

通过 File 菜单由两种选择，一种是 Save as Jobname.db，即将数据存储到 Jobname.db 文件中，这里 Jobname 是工作文件名，而 Save as 是将数据库存储到另外一个文件名上，不改变当前数据库文件状态。数据库文件（扩展名为 db）是数据库当前状态的备份。

2. 恢复数据库

恢复数据库是将数据库文件中数据导入内存，在此过程中，将首先清除当前内存中的数据，然后将之替换成数据库文件中的数据。在 File 菜单中可以通过两种方式导入数据。一种是 Resume Jobname.db 即恢复名为 Jobname.db 的数据库文件，另一种是 Resume from 即导入指定文件名的数据库，但是不改变当前文件名。恢复数据库操作对于分析非常重要，读者需要尽快养成随时进行数据库备份的习惯。

注意：

- （1）针对每个分析项目，设置单独的工作子目录，便于分析过程数据整理
- （2）针对每个分析阶段设置不同的文件名，可以在 ANSYS 启动对话框中设置，也可以通过 File 菜单中 Change Jobname 选项实现。
- （3）分析过程中，针对进展情况及时保存数据库，数据库名称需要清晰表达分析进展情况。
- （4）对将要进行的操作（如网格划分、删除等等）没有十足把握时，一定要单独保存数据库！
- （5）如果保存的数据库时间很短，可以通过 RESUME-DB 操作恢复。
- （6）注意保存 Output 文件。交互操作时 Output 文件不能自动保存，因此需要通过操作：GUI: Utility Menu : File > Switch Output to > File 将 Output 信息保存到指定文件中。
- （7）一般情况下，分析结束后需要保留文件：log 文件（.log），数据库文件（.db），结果文件（.rst, .rth），载荷步文件（.sol, so2, ...），输出文件（.out），物理环境文件（.ph1, ph2, ..）。
- （8）log 文件只会添加，不会被覆盖，但为了整理方便，必要时需要用单独文件名保存。

2.2.2 ANSYS 典型实例分析

如图 2-3 所示，使用 ANSYS 分析平面带孔平板，分析在均布载荷作用下板内的应力分布。

已知条件：F=20N/mm，L=200mm，b=100mm，圆孔半径 r=20，圆心坐标为（100，50），E=200Gpa。板的左端固定。

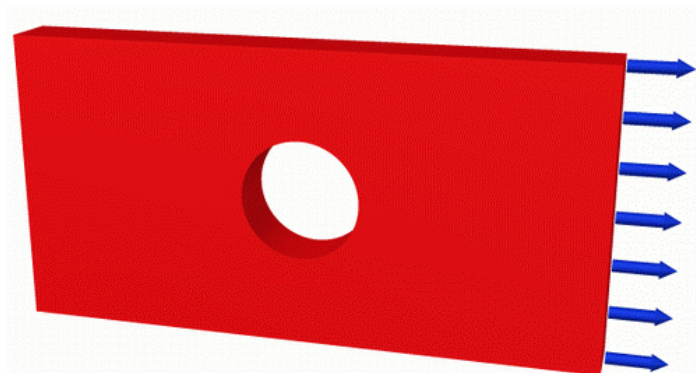


图 2-3 带孔平板模型

1. 问题描述

难度级别：普通级别。

所需时间：一个小时或者更多（视 ANSYS 操作熟练程度而定）。

实例类型：ANSYS 结构分析。

分析类型：线性静力分析。

单元类型：PLANE82

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作，布尔运算和网格细化；施加均布载荷；显示变形后形状和应力等值线图、单元信息列表；基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件：在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Structural Static Analysis 分析知识，在 ANSYS Elements Reference 部分了解 Plane82 单元的详细资料。

2. 建立有限元模型

1. 建立工作目录并添加标题

以 Interactive 方式进入 ANSYS，选择工作文件名为 Plane、标题为 plane。

2. 创建实体模型

（1）创建矩形

通过定义原点、板宽和板高定义矩形，其操作如下：

GUI: PreProcessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners

弹出 Rectangle by 2 corners 对话框（如图 2-4 所示），如图 2-4 所示填写。WP X 和 WP Y 表示左下角点坐标。

命令: BLC4, 0, 0, 200, 100



图 2-4 生成矩形

(2) 生成圆面

首先在矩形面上生成圆，然后挖去生成圆孔。生成圆面的操作如下：

GUI: PreProcessor > Modeling > Create > Areas > Circle > Solid Circle

弹出 Solid Circular Area 对话框（如图 2-5 所示），依图 2-5 输入圆面几何参数。



图 2-5 生成圆

命令: CYL4, 100, 50, 20

下面通过布尔“减”操作生成圆孔，其操作如下：

GUI: Processor > Modeling > Operate > Booleans > Subtract > Areas

先选择矩形面为 Base Area，单击 OK 按钮，然后选择圆，单击 OK 按钮。布尔操作完毕之后，实体模型如图 2-6 所示。

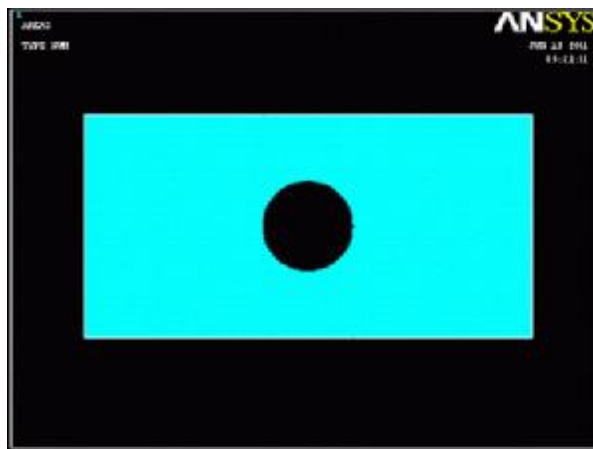


图 2-6 实体模型

3. 定义材料属性

材料属性是与几何模型无关的本构关系，如弹性模量、密度等。虽然材料属性不是与单元直接相联系在一起，但是由于计算单元矩阵时需要材料属性，ANSYS 为了用户分析过程中定义材料属性方便，对每个单元类型进行了相应的分类。根据不同类型的应用，材料属性可以是线性或非线性的。与单元类型相似，材料也可以定义多个，系统自动根据材料定义的顺序编号。本问题只有一种材料，因此只需定义一种材料，而且只需定义弹性模量和泊松比，其操作如下：

GUI: PreProcessor > Material Props > Material models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出对话框中键入 EX=20000（单位 Mpa），PRXY=0.3。

4. 划分网格

划分网格首先选择合理的单元类型，然后定义单元的实常数，最后根据分析问题的需要划分网格。

（1）选择单元

对于任何分析，必须在单元类型库中选择一种或者多种合适的单元类型。单元类型决定了附加的自由度（位移，转角、温度等）。许多单元还需要设置一些单元选项，比如单元特性和假设。单元结果的打印输出选项等，对于本问题选择 Plane82 单元。选择单元得操作如下：

GUI: PreProcessor Menu > Element Type > Add/Edit/Delete

选择 Plane82，弹出单元类型对话框（如图 2-7 所示）。单击 OK 按钮。

命令: ET, 1, plane82

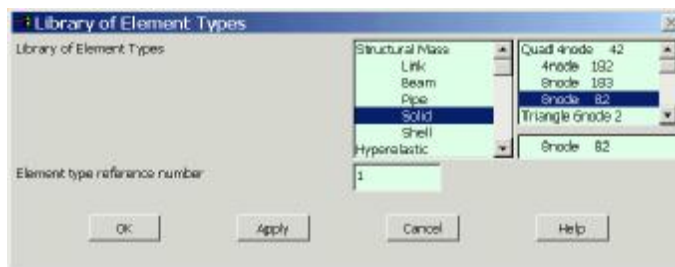


图 2-7 选择单元

(2) 定义单元实常数

有限单元的几何特性，不能仅用其节点的位置充分表达，这时需要提供一些实常数来补充几何参数。典型的实常数有壳单元的厚度，梁单元的横截面参数，板单元的厚度等。这些单元类型所需要的实常数以实数数值的形式输入。本问题所用单元类型为带厚度平面应力分析，因此分析类型设定为 Plane strs w/thk 类型，操作如下：

GUI: PreProcessor Menu > Element Type > Add/Edit/Delete > Options

命令: KEYOPT, 1, 3, 3

单元厚度为 20mm，定义单元厚度操作如下：

GUI: PreProcessor Menu > Real Constants > Add/Edit/Delete > Add

在弹出的对话框中键入材料厚度值。

命令: R, 1, 20

(3) 设定网格尺寸

这里让 ANSYS 知道需要划分多大网格。这里采用用户自定义网格尺寸参数，其操作如下：

GUI: PreProcessor > Meshing > Size Cntrl > Manual Size > Areas > All Areas

在弹出 Element Size on All Selected Areas 对话框(如图 2-8 所示)，在 SIZE 栏键入 25mm。



图 2-8 定义网格尺寸参数

命令: AESIZE, ALL, 25

(4) 划分网格

让 ANSYS 知道网格大小后，现在划分网格，操作如下：

GUI: Processor > Meshing > Mesh > Areas > Free > Pick All

命令: AMESH, ALL

图 2-9 所示为模型网格图。

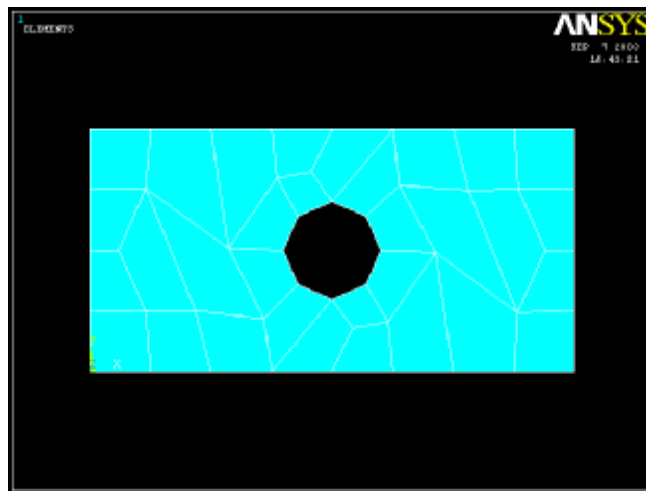


图 2-9 模型网格

(5) 保存数据库

GUI: Utility Menu > File > Save as...

输入文件名为 Mesh （表示分析进度：已完成网格划分）。

3. 施加载荷并求解

在这里首先定义模型约束，然后施加载荷，最后求解，为后处理查看结果提供数据，具体操作步骤如下所示：

1. 定义约束

由已知得，需要固定（Fix）板左边线，即需要约束线上节点所有自由度（All DOFs），其操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Lines

弹出 Apply U, ROT on Lines 对话框（如图 2-10 所示）。选择板左侧边线，在 Lab2 栏选 All DOF。单击 Apply 按钮。



图 2-10 定义约束

2. 施加载荷

在板右侧边施加均布载荷，载荷大小为 $20/20=1\text{Mpa}$ ，施加载荷操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On Lines

弹出 Apply PRES on Lines 对话框（如图 2-11 所示），键入载荷值-1（由于载荷方向离开板，为拉力所以为负值，反之为正），单击 OK 按钮。图 2-12 所示为模型载荷及约束图。

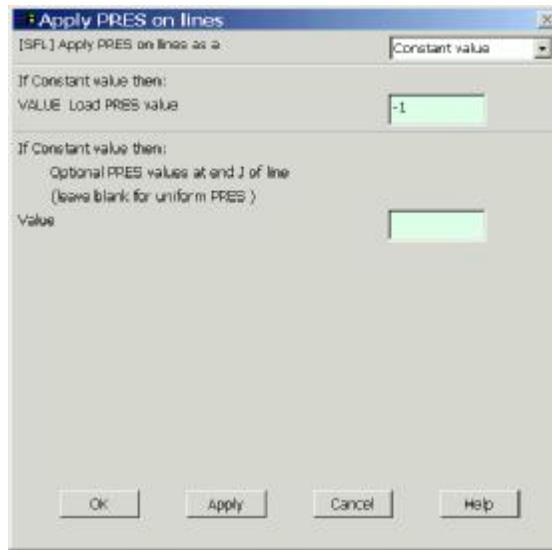


图 2-11 施加载荷

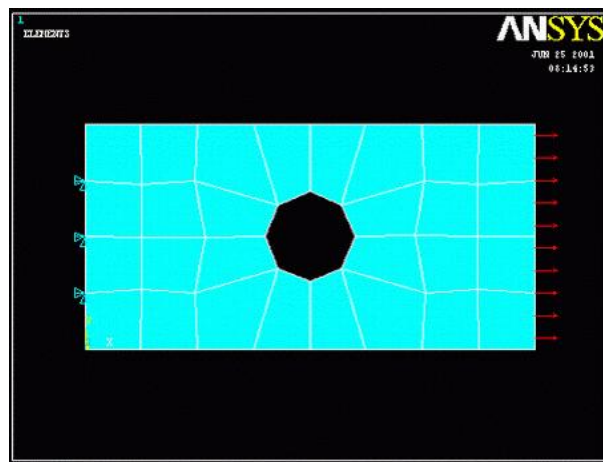


图 2-12 模型载荷及约束

3. 求解

GUI: Solution > Solve > Current LS

4. 查看分析结果

查看分析结果也就是在后处理器中以图形或列表方式显示分析结果，通常静力分析采用通用后处理（POST1）查看指定载荷步的整个模型的分析结果，并将对分析结果进行验证。为便于结果验证，首先计算参考数据，对于本问题参考数据主要是孔得最大位移及最大应力值。

1. 计算参考数据

由解析解得，最大偏移出现在板得右侧边，大小为 0.001mm（忽略圆孔因素），由于板内有孔，因此实际数值应该比解析解要大；由解析解得，无限大带圆孔板得最大应力集中系数为 3，并随着圆孔半径与板宽比值增大而增大；最大应力出现在圆孔得最顶端和最下端，大小为 3.9Mpa。

2. 查看分析结果（ANSYS-初次分析）

由于最大应力出现在孔的顶点（最高处节点），因此需要通过顶点应力值进行验证。提取顶点节点应力值，首先绘制节点图，显示节点及其序号，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...

Utility Menu > Plot > Nodes

图 2-13 所示黄色矩形框所选序号为圆孔最高处节点 49 号。

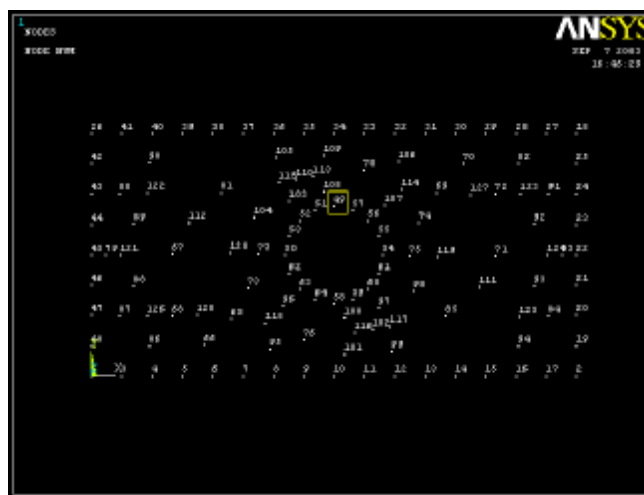


图 2-13 选择参考节点

再找出此节点得应力值，显示节点应力其操作如下：

GUI: General Postproc > List Results > Nodal Solution > Stress, Principals SPRIN

从应力列表中找到 49 号节点得应力值为 2.914MPa，与解析解相差太大，需要重新划分网格。

5. 调整网格参数重新求解

由于结果收敛太差主要是网格密度太粗糙，这里需要调整的参数就是网格密度。下面介

绍调整网格参数得操作步骤。

首先重新设定网格尺寸参数，操作如下：

GUI: PreProcessor > Meshing > Size Cntrls > Manual Size > Areas > All Areas

单元边长减小到 20mm。

重新划分网格，其操作如下：

GUI: PreProcessor > Meshing > Mesh > Areas > Free > Pick All

单击 OK 按钮。计算新网格密度下分析结果，操作如下：

GUI: Solution Menu > Current LS

6. 查看新的分析结果

重新计算得到数值为：最大应力为 3.8Mpa，与解析解相差 2.5%，最有位移为 0.0012，比解析解大 20%，考虑圆孔影响，最大位移值可以接受。下面查看分析结果，对于静力分析主要是模型位移及等效应力等值线图或者节点结果数据列表。

1. 查看位移等值线分布

其操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Nodal Solution

图 2-14 为模型位移等值线图。

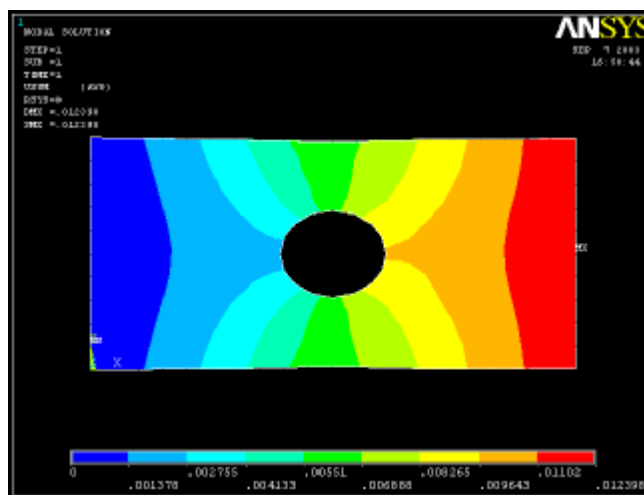


图 2-14 位移等值线图

2. 列表显示位移结果数据

其操作如下：

GUI: General Postproc > List Results > Nodal Solution

查看左侧边上的节点位移是否为零（由于边上所有节点已被固定，所以任意节点的位移均应该为零，这也是验证的一个方面）。

3. 显示等效应力等值线图

其操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu > Stress > Von Mises

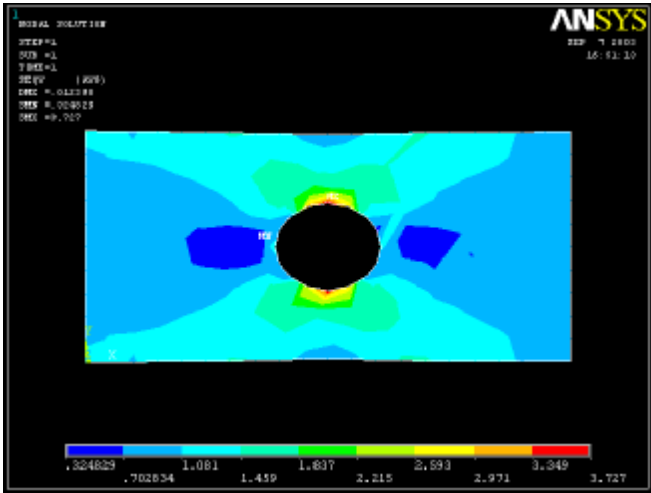


图 2-15 等效应力等值线图

发现最大应力出现在孔的上下顶点，与解析解吻合。

4. 显示节点应力值

验证节点应力值是否合理，其操作如下：

GUI: General Postproc > List Results > Stress > Principals SPRIN

列表显示分析结果与参考数据相吻合，表明 ANSYS 分析结果可靠。

7. 命令流文件求解

下面是问题求解的全部命令流程。对比 GUI 操作可以看出命令输入方式的巨大优势：非常简介，流畅！但是，熟练的使用命令输入分析不仅要求读者对所分析的问题非常熟悉而且要求对 ANSYS 命令非常熟悉。希望读者尽快熟悉命令输入方式，特别对要进行 ANSYS 二次开发的读者非常有帮助！

```
!Command File mode of 2D Plane Stress Verification
/title, 2D Plane Stress Verification
/PREP7                !进入前处理器
BLC4, 0, 0, 200, 100  !矩形, 左下角坐标, 宽, 高
CYL4, 100, 50, 20     !圆, 圆心坐标, 半径
ASBA, 1, 2            !减去圆
ET, 1, PLANE42        !单元类型
KEYOPT, 1, 3, 3       !定义带厚度平面应力分析
R, 1, 20              !1# 材料实常数, 板厚为20mm
MP, EX, 1, 200000     !材料属性, 1# 材料, 弹性模量, 200000 MPa
MP, PRXY, 1, 0.3      !材料属性, 泊松比 , 0.3
AESIZE, ALL, 5        !单元边长5mm
```

AMESH, ALL	!划分网格
FINISH	!退出前处理状态
/SOLU	!进入求解
ANTYPE, 0	!分析类型静力分析
DL, 4, , ALL, 0	!定义4#线（左侧边）约束, All DOFs
SFL, 2, PRES, -1	!右侧边施加均布载荷（2#线）
SOLVE	!求解
FINISH	! 求解完毕, 退出求解状态
/POST1	! 进入通用后处理器
PLNSOL, S, EQV	! 显示等效应力等值线图

8. 实例总结

1. 关于建模的总结

熟悉基本的建模操作，掌握布尔减操作，可以进行简单的面相减操作。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握施加均布载荷的操作步骤，可以在线上施加均布载荷。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握细化网格的操作，可以根据结果判断网格密度是否合理，是否需要细化；掌握显示变形图形和应力等值线图的操作；了解基本的验证技巧，可以根据单元应力分布情况判断分析结果是否收敛。

2.3 前处理

前处理是指建立有限元模型的过程，它包括创建实体模型，定义单元及材料属性，划分网格，修正模型等几项内容。有限元模型主要来源有两种，即 ANSYS 平台建模和导入 CAD 软件中创建的有限元模型。ANSYS 的建模过程与在 CAD 软件中建模的过程相似，通过数学的方式表达实体模型的几何参数，以此划分内部节点和单元，不仅如此，还可以在实体模型边界上方便的施加载荷、定义约束。但是实体模型并不参与有限元分析。所有施加在实体模型边界上的载荷或约束必须最终传递到有限元模型的节点上才能进行求解。

2.3.1 有限元模型的来源

ANSYS 主要有以下几种模型来源：

（1）创建实体模型，划分有限元网格

（2）从其他 CAD 软件导入实体模型，然后在 ANSYS 上进行修正，划分网格得到有限元模型

（3）直接创建节点和单元（对于简单的二维梁结构和桁架结构这种方法非常好，具体实例参考后面第二章静力分析部分二维桁架、三维桁架结构分析实例）

（4）从其他软件中建立有限元模型，将节点、单元数据导入 ANSYS（具体实例参考上章数据接口部分实例）

2.3.2 ANSYS 图元

ANSYS 实体模型由图元表示，各种类型图元将关系如图 2-16 所示。下面是 ANSYS 的图元类型：

- (1) 体（三维模型），代表三维实体
- (2) 面（表面）由线围成，代表实体表面、平面形状或壳体（可以是三维曲面）
- (3) 线（可以是空间曲线），由关键点定义端点，代表实体的边
- (4) 关键点代表实体的角点

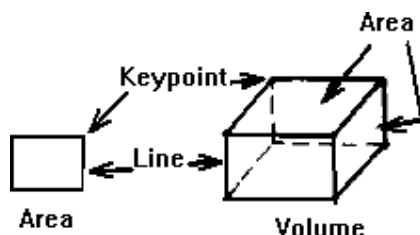


图 2-16 ANSYS 图元

按照图元阶数排列(从低到高)顺序为：点(Keypoints)-线(Lines)-面(Areas)-体(Volumes)。图元的阶数对图形操作有重要影响，如果低阶的图元附属于高阶图元，则此低阶图元不能删除，如果可以删除，那么高阶图元将变得混乱。

所有的图元均是在工作平面上建立的，下面将介绍工作平面的使用。

2.3.3 设置工作平面

工作平面（WP，WorkPlane）是一个参考平面，通过工作平面用户可以创建各种类型的图元。下面介绍工作平面的一般操作及工作平面在实体建模中的作用。首先介绍基本的工作平面设置：

显示工作平面可以采用如下操作：

GUI: Utility Menu > work Plane > Display Working Plane

设置工作平面的辅助网格开关可以如下操作：

GUI: Utility Menu > work Plane > WP Settings ...

通过弹出对话框可以设置网格的是否打开、网格间隔。

1. 设置捕捉功能

徒手操作建模时，捕捉功能用于可以控制的增量来代替光标移动，可以更准确方便的选定坐标或关键点等。通过设置可以打开或关闭捕捉功能，调整捕捉增量、设置与工作平面的几何参数等。设置捕捉功能，操作如下：

GUI: Utility Menu > Work Plane > WP Settings ...

选择打开、关闭或者输入捕捉增量。

2. 移动工作平面

ANSYS 默认工作平面原点和总坐标原点重合，为了建模时方便，ANSYS 允许移动工作平面允许读者在定义不同位置实体图元。工作平面移动通常是通过增量方式实现，操作如下：

GUI: Utility Menu > Work Plane > Offset WP by Increaments

通常移动工作平面的主要方式是平移和转动，即通过输入各个坐标轴的平移量或者相对于各坐标轴的夹角移动工作平面（详细使用参考第七章的拓扑优化实例分析）。

3. 工作平面及激活坐标系

工作平面是二维的绘图坐标，用于几何图元定位。例如可以在工作平面上定义关键点，操作如下：

GUI: Utility Menu > Processor > Modeling > Create > Keypoints > On Working Plane

总体及局部坐标系，如柱坐标、极坐标用于设定几何图元在空间的位置。例如可以在激活坐标系中定义关键点，操作如下：

GUI: Utility Menu > Processor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

定义关键点的方式参考各章实例分析的建模部分。

4. 二维基本体素

为了简化建模难度，提高分析效率，ANSYS 软件预先设定了常用的几种二维体素。所谓体素就是预先定义好的、具有共同形状的面或者体。ANSYS 体素如图 2-17 所示。下面介绍体素得创建及修改方法：

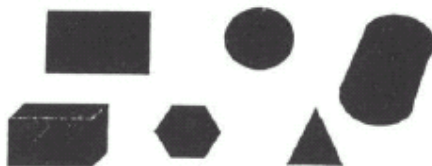


图 2-17 ANSYS 体素

1. 创建二维体素

通过前处理建模（Modeling）的创建功能可以生成所需的体素，其操作如下：

GUI: Utility Menu > Processor > Modeling > Creaate

在树状菜单中，用户可以选择定义各种类型的体素，如一维（点）、二维的线、三维体等。体素创立后 ANSYS 根据创建顺序自动赋予图元编号。如创建一个四边形，等于创建了四个关键点、四条线、一个面，共计 9 个图元。

2. 显示图元

通过 Plot 命令显示图元，操作如下：

GUI: Utility Menu > Plot > Keypoints 或者 Lines 或者 Areas 或其他需要图元。

不仅如此，还可以显示图元的编号，其操作如下：

GUI: Utility Menu > Plot Ctrs > Numbering...

在弹出对话框中设定需要显示那种类型的图元编号，可以是关键点、节点、线、面、体等一种或者几种类型的图元序号（具体应用参考第三章梁的静力分析实例）。

3. 删除图元

根据建模过程的需要，用户可以删除不再需要的图元。删除时用户可以根据 ANSYS 树状菜单选择，详细的指定需要删除和保留的图元，不至于出现操作错误。

建议：

复杂实体模型建模过程中，删除图元之前建议保存数据库，防止出错。

5. 布尔操作

ANSYS 的图元运算是通过布尔操作实现的，通过布尔操作，用户可以将简单体素整合为非常复杂的实体模型。可以说只要在 ANSYS 平台上建模就离不开布尔操作！布尔操作包括 Add（加，将各个体素融和为一个整体，用一个编号表示）、Subtract（减，将一个体素从另一个体素中减去，剩余图元赋予新的序号）、intersect（相交，通过图元的公共界面重新划分）、glue（粘合，将几个有公共界面的图元粘合在一起，但是保留原有边界）和 Overlap（搭接），这些操作不仅可以用于简单体素的图元，也适用于从 CAD 软件导入的实体模型。进入布尔操作菜单操作如下：

GUI: Utility Menu > Processor > Modeling > Operate

通常情况下，进行布尔操作时比较容易确定对象图元，只有当实体模型非常复杂时需要通过显示图元序号，借助图元序号帮助选择图元。下面介绍 ANSYS 建模过程中最常用的布尔操作：

1. 粘合（Glue）和搭接（Overlap）

粘合操作将两个图元接到一起，并保留各自边界。考虑到网格划分的合理性，在网格划分时经常先分别建立实体模型，然后再 Glue。划分单元时 ANSYS 根据原有边界进行划分，能够保证对特殊区域网格密度的要求。这种方式还有一个好处，那就是可以减少网格划分所需时间—ANSYS 划分大部件时比划分各个小部件时间总和要多！这也是为什么 Glue 比 Add 操作应用的更广泛。

搭接操作与粘合操作基本相同，不同的是搭接操作输入的图元除了保留各自形状外还可能产生重叠区域，形成多个图元。

2. 分解（Divide）

分解是将一个图元分解为两个图元，但是二者之间仍保持相互连接，通常在 ANSYS 建模过程中用于将一个复杂体分成多个规则体，为合理划分网格提供便利。分解所用参考工具可以是工作平面、指定面或者线等。

3. 选取公共部分（Intersection）

Intersection 就是取几个同类图元的公共部分，然后将所有取到的部分作为一个新的图元。通常用于取二维图元的公共部分（详细使用参考第七章拓扑优化分析实例）。

6. Bottom-up 建模

与先定义体素不同，Bottom-up 建模首先定义关键点，然后根据关键点定义直线，随后是

面、体，最终建立非常复杂的几何实体。通常所用单元比较简单时，如梁单元，常用这种方法，而且可以在建模的过程中定义网格，省去网格划分的步骤。多数 ANSYS 建模过程是两种方法，即 Bottom-up 法与 top-down 法（即先定义体素）交替使用，尽量利用两种方法各自的优势，提高建模效率。下面介绍 Bottom-up 建模的主要操作：

1. 定义关键点

关键点可以有多种方法定义，所用方法随用户的习惯的差异各不相同。下面是关键点的创建方法：

（1）在工作平面上创建关键点

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Keypoints > On Working Plane

（2）在两个关键点之间创建关键点

GUI: Main Menu > Processo > Modeling > Create > Keypoints > KPs between KPs

（3）修改关键点

GUI: Main Menu > Processo > Modeling > Move/Modify > Keypoints > set of kps

（4）修改单个关键点

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Move/Modify > Keypoints > single Kp

注意：

（1）创建或者修改关键点后，将自动清除与之相联的任何单元网格，并且在当前激活坐标系下重新定义与之相关的图元，这可能对实体建模、网格划分产生很大影响，需要非常注意。

（2）不与线或网格相联的已存在的节点可以通过重新定义新坐标值的方法改变其位置，否则只能通过 Keypoint Modify 功能进行修改。

（5）计算已知关键点间距离

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Check Geom > KP distance

（6）复制关键点

GUI: Main Menu > Pcessor > Modeingl > copy > keypoints

2. 定义直线

直线是建模过程中常用的图元，通过线定义所需的面、体具有极大的优势。下面介绍线生成与修改中最常用的功能：

（1）修改直线

通常可以通过布尔操作或 Move/Modify 功能进行修改。

（2）通过关键点定义直线

在当前激活坐标系这种方式应用非常广，具体其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Llines > Lines > In Active Coord

注意：

线的形状由其所在的激活坐标系决定：在笛卡儿坐标系中两个点生成的是一条直线，在柱坐标系中或极坐标系中生成的可能不是直线而是一段圆弧或螺旋线（详细使用参考第三章的三维实梁应力分析实例）。

（3）通过关键点拟合 Spline 曲线

在定义曲线时，首先定义一系列的关键点，然后通过这些关键点拟合出所需曲线。一般

这种方式生成的线可以任意修改的，只有特殊情况（其他图元联在一起），需要借助 Move/Modify 功能进行修改。通过关键点拟合曲线的操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Lines > splines > spline thru KPs

(4) 将直线分段

建模过程中常出现需要从一条线的中间某一个点，引出线或定义面。这时需要借助布尔 Divide 操作实现，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > Lines into N Ln's

3. 定义面

生成面有多种方式，可以通过关键点定义，也可以通过线定义，也可以直接生成面。下面介绍定义面的最常用的几种方式：

(1) 通过关键点定义面

这一般是不规则的形状的面，通过关键点来定义面的边界然后生成面，其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Area > Arbitrary > through kps

(2) 通过线生成面

通过线定义面可以用于生成不规则曲面。首先生成线（面的轮廓），然后通过扫略线的方式生成面，其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Area > arbitrary > By lines

(3) 沿路径 Extrud/Sweep 生成面

常见方式是通过线拉出不规则面。首先定义边界线然后 Extrud/Sweep 出面，其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > About Lines

(4) 绕轴向旋转生成面

通常采用这种方式生成对称实体：线生成线定义对阵实体的母线，然后绕轴向扫描出来面。其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Areas > About Axis

(5) 在两个面之间生成过渡面

这种方式常用于修补形状变化比较剧烈的面与面之间的实体部分，降低此处的网格密度及应力集中系数，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Create > Areas > Area Fillet

4. 定义三维实体

ANSYS 分析中体是经常遇到的，而且 ANSYS 应用之所以这么广泛、受到这么多用户的欢迎就是因为 ANSYS 在创建复杂实体方面有着巨大优势。下面介绍 ANSYS 最常用的体生成操作方式：

(1) 通过关键点生成体

即通过三维几何实体的顶点生成实体，操作如下：

GUI: Main Menu > Processro > Modeling > Create > Volume > Through KPs

通过关键点定义几何实体时，首先沿体下部依次定义一圈连续的关键点，然后再沿着上部依次定义一圈关键点。

(2) 通过面生成三维几何体

常见于扫描面生成三维实体，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > create > Volume > by areas

(3) 沿路径拖拉出体

常见于不规则形状三维实体建模。首先通过线生成截面，然后拖拉出实体，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > Along lines

(4) 沿轴线旋转出体

常见于轴对称实体建模过程。首先生成母线，然后绕对称轴旋转出体，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Operate > extrude > Aeras > About Axis

(5) 沿法向移动面生成体

常见于先定义二维网格，然后拉出三维单元建模过程，操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Operate > Extrude > Area > Along Normal

(6) 指定起始面和中止面的比例，拖拉出体

常见于不规则三维实体或锥体建模过程，具体其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Operate > Extrude > Areas > by XYZ Offset

5. 复制实体

建模过程中，为了加快建模速度一般不新生成实体而是尽量通过拷贝已有实体减少建模工作量。三类实体（点、线和面）的复制操作基本一致。下面以复制面为例介绍实体复制操作：

GUI: Main Menu > Processor > Modeling > Copy > Areas

6. 通过已有实体生成新图元

通常建模过程中，如果实体模型是对称模型一般只创建模型的一半，然后通过 Reflection 功能获取整个模型减少建模工作量，操作如下：

GUI: MainMenu > Processor > Modeling > Reflect

通过这种方法可以生成所有的对称实体，包括点、线、面、体等。

2.3.4 定义单元属性

实体建模完毕，在划分网格之前需要定义单元属性。单元属性是指在划分网格之前必须指定的要分析的对象特征，其特征包括三个方面：材料属性、单元类型、实常数。下面介绍定义单元属性的主要步骤：

1. 定义材料属性

ANSYS 分析中所有材料必须定义材料属性，如结构分析中需要定义材料的弹性模量、泊松比（有时不需要），热分析需要定义材料的导热系数 KXX 等。具体的材料属性通过 ANSYS Help 文件了解，这里就不再详述。了解材料属性的参数后，定义材料属性。通常分析遇到的主要是各向同性、线弹性材料，下面以此为例定义材料属性，具体操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

命令: MP

在弹出对话框中键入材料的弹模模量和泊松比，另外必要时还可以定义材料初始温度，如瞬态热传导分析。

2. 选择单位制

除了磁场分析外，其它类型分析中用户可以不用告诉 ANSYS 所用单位，只需用户自己清楚即可。但是不论何种单位制都必须保证各个输入参数单位制一致：所用数据单位直接影响到实体模型尺寸、材料属性、实常数及载荷等。建议读者在进行分析之前首先确定单位制，然后将所有参数以此单位制表示。如果对所用单位制不是很确定，可以通过/UNIT 命令指定参数单位制。

建议：

为防止出错，建议所有参数的单位制采用国际单位制。

3. 选择单元

用户从 ANSYS 的单元类型库选择所需单元类型之前，如果对所用单元不很熟悉，可以通过 Help 文件了解所需单元详细信息，然后选择合理的单元。这里向读者介绍一些常用的单元及其用途。

1. 常用单元简介

ANSYS 单元库中有 120 多种单元，其数目随着计算技术和材料计算技术的发展不断增长。对于大多数用户而言，需要根据分析类型选择单元类型。

在结构分析中，结构及分析状态决定单元类型的选择。通常选择单元的原则是尽量选用维数比较少的单元达到预期效果（即尽量选择点而不是线，能选择线尽量不选择面，能选择面不选择壳，能选择壳不选择体）。对于复杂结构分析，应当考虑建立两个甚至更多不同复杂程度的模型做对比分析，尽量获取最佳分析效果。下面介绍常见单元类型：

（1）线单元

Beam（梁）单元用于梁结构、薄壁管、C 形截面构件、角钢或者狭长薄壁构件（即构件只有膜应力和弯曲应力的情况）等模型分析。

Spar（杆）单元用于弹簧、螺杆、预应力螺杆和薄膜桁架等模型分析。

Spring（弹簧）单元用于弹簧、螺杆、细长构件或通过刚度等效代替的复杂构件等模型分析。

（2）壳单元

Shell 单元用于薄平板或曲面模型。选择壳单元的基本原则是板的边长不小于其厚度的 10 倍值，而且比值越大精度越高。

（3）平面单元

在整体笛卡儿坐标系的 XY 平面内（模型平面与此平面重合），有几种 ANSYS 单元可以用来进行平面应力、平面应变、轴对称或谐响应分析，下面介绍最常见的几种分析类型的特性：

平面应力：假定 Z 轴上的应力为零，主要特点是其 Z 轴方向的几何尺寸远远小于 X 方向和 Y 方向尺寸，所有载荷分布在 XY 平面，而且载荷不随 Z 方向尺寸变化而变化，Z 轴方向存在应变。平面应力主要用来分析承受面内载荷的平板分析，承受压力或远离中心载荷的薄盘类结构分析。

平面应变：假定 Z 轴方向的应变为零，其特点是模型 Z 方向尺寸远远大于其 X、Y 方向

尺寸。所有载荷施加在 XY 平面内，在 Z 轴方向存在应力，运动只发生在 XY 平面内。平面应变分析是用于分析 Z 方向尺寸远远大于其它两个方向的尺寸，垂直于 Z 轴的横截面保持不变。

轴对称：假定三维实体模型是 XY 平面内横截面绕 Y 轴旋转 360° 而成的构件，如管、锥体、圆板、圆盘等；对称轴必须和 Y 轴重合，即 Y 方向为轴向，Z 方向为环向（Hoop），X 方向为径向，环向位移为零，环向应力和应变明显，只能承受轴向载荷。

2. 三维实体单元

对于几何、材料、载荷或分析结果要求考虑的细节等原因造成的无法采用简单单元解析建模的结构只能采用三维实体单元。

3. 线性单元/二次单元/P 单元

在决定采用那种类型单元后，需要一步确定单元的插值函数，考虑是否需要采用线性、二次或 P 单元。线性单元和高阶单元之间的差别：线性单元只有角节点（即单元顶点），而高阶单元还有边中节点（即每个边上还有节点）。线性单元的节点位移按照线性变化，因此大多数单个线性单元上的应力是常数。二次单元假定位移节点位移按照二次曲线变化，因此单个单元上应力是线性变化的。P 单元的节点位移可以在二阶和八阶之间进行选择，而且具有求解收敛自动控制功能。在许多情况下，与线性单元相比，采用更高阶类型单元可以获取更高的计算精度。

在选择单元类型时需要考虑的因素很多，不仅是阶数问题，还需要考虑其他情况，比如线性单元的扭转变形可能引起精度下降，由于更高阶数的单元对于这种扭转变形不敏感，因此，在这种类型问题分析时应该采用阶数比较高的单元类型。单纯就求解精度进行比较，线性单元和二次单元网格之间的差别没有平面单元和三维单元网格之间的差别大。

4. 定义实常数

实常数在 ANSYS 分析中是指补充单元所需的几何特征参数，如梁单元的横截面面积、壳体单元的厚度、平面单元的厚度等等。定义实常数其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Real Constants

命令: R

2.3.5 划分网格

选择单元后进入有限元建模的最有的一步：网格划分。下面介绍划分网格的主要步骤及划分网格时参数的设置。

1. 划分网格的主要步骤

划分网格主要分为以下几个步骤：首先定义单元属性，即单元类型、实常数、材料属性，然后设定网格尺寸，控制网格密度；网格划分前保存数据库，当网格质量太差时直接恢复数据库重新划分网格；最后划分网格。网格划分时尺寸参数控制及划分通过 MeshTool 菜单执行，其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > MeshTool

在操作过程中要密切注意网格密度的控制，如果不需要详细设置模型的区域网格参数，

可以采用 ANSYS 默认设置划分实体网格。下面介绍划分网格时的 ANSYS 默认设置：

1. Free 网格划分：对于二维网格没有特殊要求或者二维网格中占绝大多数的是四边形单元和部分三角形单元的二维实体；对于三维实体全部生成四面体单元。
2. 单元尺寸由 ANSYS 自动根据模型类型及其复杂程度决定。
3. 默认材料属性为 1# 材料，1# 单元类型，1# 实常数。

ANSYS 划分过程中有很多不同的网格尺寸设置方式：SmartSize、Global 设置等，指定网格尺寸、指定线上单元分割数及间距控制，指定关键点附近单元尺寸控制，层网格划分——即在壁面附近划分较细密网格（通常用于 CFD 边界层及电磁分析中的肌肤效应分析），网格细化——即在特定区域细化网格。为保证网格划分质量，一般组合使用上述方法。对于一般问题的网格划分，最简便的是 SmartSize 法，即所谓的智能网格划分技术，这种方法考虑几何图形的曲率及线之间的变化梯度，一般所需密度为 4~6 即可。如果对于网格划分有特殊要求，建议通过 ManualSize 设置，详细指定 keypoints、Lines、Areas、Layers 的网格划分参数保证分析结果的可靠性。

2. 设定网格尺寸参数

对于有限元分析而言，网格密度决定分析结果的质量。一般情况下，网格密度越大，计算结果收敛的越好，计算精度越高。细密的网格大多数情况下可以获取更加精确的结果，但是有时增加网格的密度而分析结果却没有多少改观——这时结果可能已经非常接近理论解，继续增加网格密度已经没有多大意义了。

前面介绍过了 SmartSize 控制网格密度，这里将介绍另外一种方法即采用 Global 设置全局单元尺寸值 (Global Element Size)，其设置的单元尺寸参数覆盖所有默认设置，其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Size Ctrs > Manual Size > Global > Size

单纯限定单元尺寸参数并不能得到非常高质量的网格，对于特殊区域需要通过下面操作进行单独设定：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > SizeCtrls > ManulSize

在特定的 Keypoints、Lines、Areas、Volumes 上或附近定义网格参数，得到高质量的网格。ManulSize（人工设置）等级高于其他设置，网格会根据人工设置进行调整。

注意：

- (1) 事先在建模过程中清除变化基本剧烈的几何部分（如果此部分对于分析结果影响不大）。
- (2) 网格尺寸变化剧烈的部分必须重新划分网格-此部位网格划分时经常出现的错误，网格尺寸变化剧烈的区域应力分析结果一般不可取。
- (3) 复杂曲面划分网格时应该确保曲边处单个单元边不能超过 15° 的圆心角。否则此处将产生反单元，造成分析出错。
- (4) 四面体网格划分失败会占用非常多的时间。为了避免出现划分失败可以采用一个简单的办法：采用 6 节点三角形单元划分实体表面，如果没有出现网格尺寸畸变，则四面体网格划分基本没有问题。
- (5) 绝对避免网格划分完毕后进行布尔减操作！这样会造成网格不匹配。如果必须这样做，那布尔减操作后必须重新划分网格！

网格参数设定完毕，最后检验模型是否完美，对于不完美的模型继续进行修改，直到达到要求未知。网格划分完毕可以进行求解处理，但是对于复杂实体还需要对实体局部网格进行细化。

2.3.6 细化局部网格

通常有两种情况需要重新划分局部区域网格：一是，网格划分完毕后希望在特定区域进行细化；二是，已经查看分析结果，发现局部区域收敛精度太差，需要重新细化网格获取更高精度的结果。对于二维平面和仅有四面体单元的三维实体，ANSYS 软件允许在特定的节点、单元、关键点、线、面进行局部细化。如果，体单元不只四面体单元 ANSYS 将禁止网格局部细化。

一般网格细化通过 xRefine 命令和相关的菜单操作选择需要细化的实体、设置细化参数，下面介绍网格细化的命令及其操作：

1. 细化节点附近网格

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Nodes

命令: Nrefine

图 2-18 所示为细化效果。

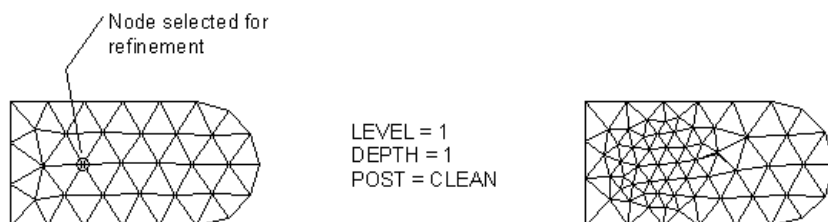


图 2-18 节点附近网格细化

2. 细化单元附近网格

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Elements

命令: Erefine

图 2-19 显示了单元附近网格细化效果。

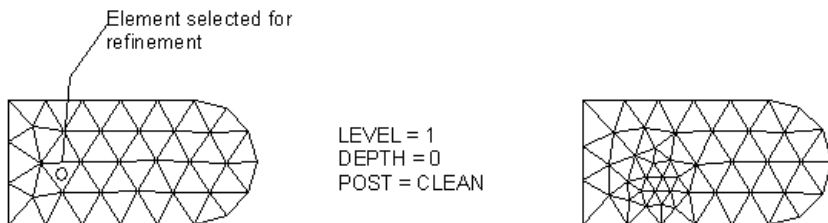


图 2-19 单元附近网格细化

3. 细化关键点附近网格

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Keypoints

命令: Krefine

图 2-20 显示了关键点附近网格细化效果。

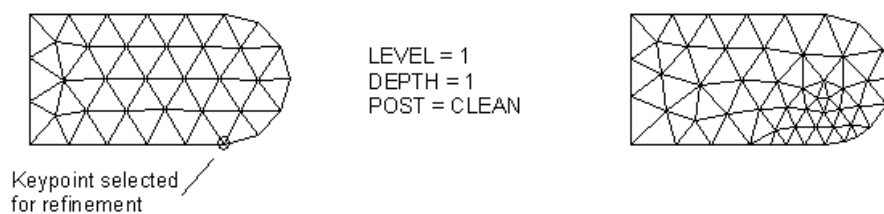


图 2-20 关键点附近网格细化

4. 细化线附近网格

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Lines

命令: Lrefine

图 2-21 显示了线附近网格细化效果。

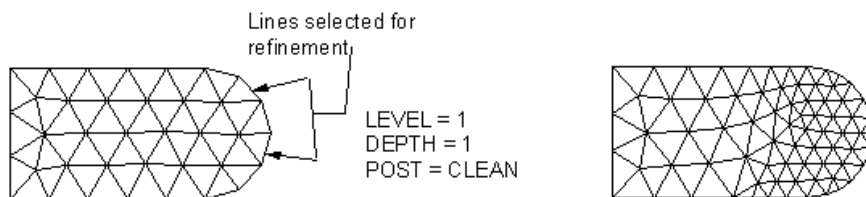


图 2-21 线附近网格细化

5. 细化面附近网格

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor > Meshing > Modify Mesh > Refine At > Areas

命令: Arefine

图 2-22 显示了面附近网格细化效果。

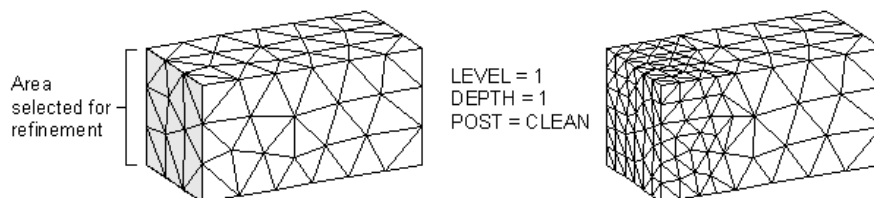


图 2-22 面附近网格细化

注意:

- (1) 虽然局部细化可以用于整体模型细化, 由于网格细化耗时较多, 建议只用于局部细化。
- (2) 三维实体只有单元为四面体单元时才能细化。
- (3) 如果细化区域为接触单元区域, 则不能进行局部细化。
- (4) 局部细化不适用于自由面单元细化。
- (5) 如果细化毗邻区域为梁单元 (Beam) 则不能细化。
- (6) 如果细化区域的节点/单元上存在直接施加的载荷, 则不能细化。
- (7) 如果细化区域定义了初始条件, 则不能细化。

2.4 加载和求解

经过实体建模、网格划分后, 分析进入施加载荷求解系统方程获取分析结果部分。下面介绍加载和求解部分应具备的知识。首先是加载、定义约束, 如果有必要还要设置求解选项 (主要对于非线性、瞬态分析)。

2.4.1 加载

ANSYS 分析中施加载荷需要根据载荷类型选择相应的加载方式。下面介绍是介绍主要载荷类型及其加载方式。首先介绍载荷类型:

1. 载荷类型

ANSYS 软件将载荷进行分类方便用户加载, 图 2-23 所示为 ANSYS 的载荷。根据载荷类型可以分为以下类型:

1. 自由度 (DOF Constraint) 载荷

定义节点的自由度 (DOF) 值, 根据不同的分析类型自由度存在差别。自由度载荷在结构分析为位移, 在热分析为温度, 在磁场分析为磁势等。

2. 集中载荷 (Force/Moment)

即常说的点载荷, 根据分析类型不同分别为结构分析中的弯矩, 热分析中的导热系数, 电磁分析中的电磁电流等。

3. 面载荷 (Surface Load)

顾名思义, 面载荷就是作用在模型表面的分布载荷, 根据不同分析类型分别为: 结构分析中的压力, 热分析中的热对流, 电磁分析中的麦克斯维尔表面等。

4. 体积载荷 (Body Load)

体积载荷指作用在体积或场域内的载荷, 即热分析中的体积膨胀、内生热, 电磁分析中的磁流密度。

5. 惯性载荷 (Inertial Load)

惯性载荷指由于构件质量或惯性引起的载荷, 如重力、角速度等。

6. 耦合场载荷 (Coupled Field Load)

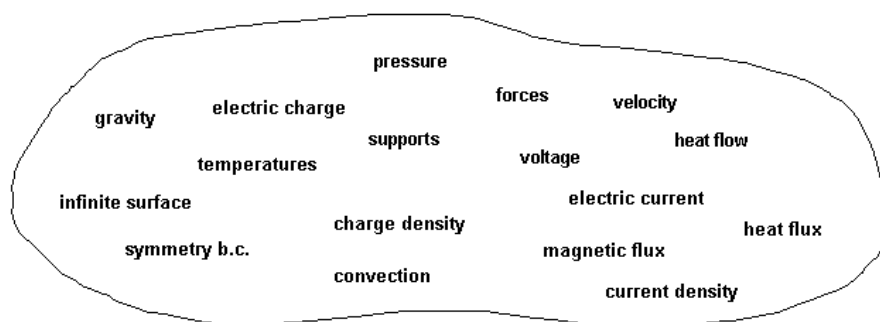


图 2-23 ANSYS 中的载荷类型

2. 加载方式

ANSYS 分析中载荷可以直接在实体模型上加载，如将载荷施加到关键、线或者面上；也可以在有限元模型上加载，即直接将载荷施加到节点和单元上。对于大多数模型，直接在实体模型上施加载荷，加载比较方便、快捷。当载荷较少或者模型比较简单时，也可以直接在有限元模型上施加载荷。下面首先介绍两种加载方式的优缺点，然后介绍最常用的实体模型加载：

1. 两种加载方式的优缺点

(1) 几何模型上的的载荷独立于有限元网格，因此重新划分网格及网格局部细化不影响载荷，不需要重新施加载荷。

(2) 与网格划分后有限元模型相比，实体模型通常包含较少实体，加载更加方便、快捷，特别适于图形窗口拾取操作。

(3) 模型划分生成的单元处于单元坐标系中，而节点处于整体笛卡儿坐标系中，因此实体模型加载和有限元模型加载可能会有不同的坐标系和加载方式。

(4) 简化分析中，实体加载不如有限元模型加载方便。

(5) 当定义关键点约束的扩展选项启用时，在两个关键点上定义的约束会扩展到关键点连线间所有的节点上，因此在启用扩展选项后在关键点上定义约束要格外小心！

2. 在实体模型上加载

在实体模型上施加载荷通过下面 GUI 操作实现：

GUI: Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural

根据加载方式的不同，这里主要介绍面载荷、轴对称载荷及自由度载荷加载：

(1) 施加面载荷

其操作如下：

GUI: Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>

在弹出对话框中输入载荷值。

注意：

对于面载荷而言，压力是正值，正表示其方向指向表面，拉力则相反。

(2) 施加轴对称载荷

一般轴对称载荷可以施加到具有对称轴的三维结构上，而三维轴对称载荷可以通过二维轴对称模型描述。图 2-24 说明了如何在轴对称结构上施加轴对称载荷。

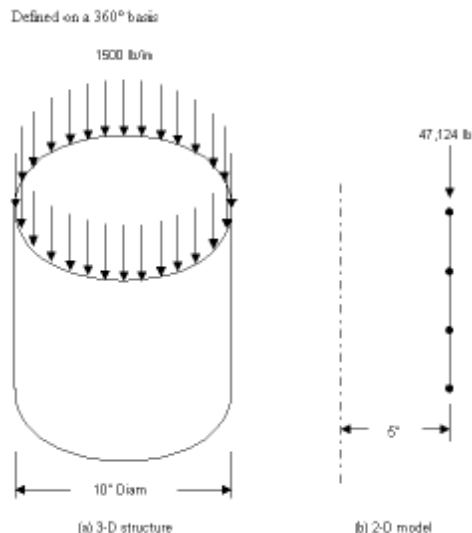


图 2-24 施加轴对称载荷

注意：

- (1) 数值载荷（包括输出的支反力）都是基于 360° 转角对称的三维结构。
- (2) 图 2-24 中轴对称模型的载荷是三维结构均布面载荷的总量。

3. 施加自由度载荷（即定义约束）

只有定义模型约束后才能满足有唯一解的条件。通常约束通过关键点、线、面定义：

- (1) 在关键点上定义位移约束

其操作如下：

GUI: Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints

在弹出对话框中定义约束。

- (2) 在线和面上定义位移约束：

其操作如下：

GUI: Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement> on Lines 或 On

Areas

在弹出的对话框根据提示选择要约束的线或面，根据约束类型定义。

加载完毕后，为保证载荷加载正确，需要进行校验。下面介绍载荷校验。

3. 校验载荷

载荷校验一般通过两个方面进行校验：一是通过显示载荷加载后模型与原有约束及载荷条件进行对比，查看载荷及约束是否正确（其菜单操作为：GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Symbols，在弹出对话框中显示模型载荷及约束）；二是通过列表显示载荷与约束的详细资料，

对照特殊点，比如固定端面、支承点等位置的载荷及约束（其菜单操作：GUI: Utility Menu > List > Loads，可以选择要详细显示的节点、线或者面的载荷及约束），具体显示那种数据需要根据载荷及约束情况确定。通常载荷校验组合使用上述两种方法，即首先在加载时通过第一种方式大致的校验载荷施加是否合理，然后通过特定的点、面的已知约束或者载荷校验加载是否合理。

4. 将载荷转化到有限元模型上

施加载荷后，在求解初始化时程序将几何实体上的载荷自动转换到有限元模型上；如果，不进行求解，则载荷转换可以通过下面操作实现：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Operate > Transfer to

通过此操作选择需要转化的载荷类型，包括约束、体力、面力、集中力及所有实体载荷等。

5. 删除载荷

在有限元模型上施加的载荷在重新划分网格时需要首先删除载荷，另外还有其他情况（比如载荷施加过程出错需要重新施加时）也需要删除载荷，具体操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Delete

一般有限元模型重新划分网格时需要全部删除载荷，其他时可以根据提示删除部分或者全部载荷。

6. 选择求解器

求解所需条件到此全部满足，下面选择求解器。求解器的功能是求解关于结构自由度的线性矩阵，需要花费的时间根据自由度的多少变化，具体的时间由所用计算机速度决定。

ANSYS 软件提供两个直接求解器，即波前求解器和稀疏矩阵求解器，与此同时还提供了五个迭代求解器：PCG, JCG, ICCG, DDS 和 AMG 求解器。两个直接求解器和 PCG 求解器可以用于非线性问题分析；对于模态分析 ANSYS 提供了六种不同的特征值提取法；对于 CFD 及电磁问题，也有针对的求解器。这样针对不同类型问题 ANSYS 分别提供了不同的求解器选择，极大的方便了求解设定，提高了计算精度。

求解中发生奇异时，直接求解器会发出警告，提示“主对角值元”或“主元”太小或者为负值。在线性求解中，此类问题多数是单元形状畸变引起的，在非线性求解时，除了单元形状因素外还可能是求解发散。

PCG 求解器不预先检测求解的奇异问题，即使出现奇异，计算继续进行知道完毕，输出错误信息。因此在求解设置上，需要根据所分析问题的类型进行预先评估在选择合理的求解器。

2.4.2 求解

选择合理的求解器后，准备求解。在求解进行之前需要先了解结果文件的类型及求解开始前准备工作。下面首先介绍结果文件类型。

1. 结果文件

分析结果保存在数据库中并输出到结果文件。结果文件由于分析类型不同, ANSYS 赋予不同的后缀(如 Jobname.rst 表示结构分析结果, 而 Jobname.rhh 则表示热分析结果), 方便用户管理文件。

2. 检验数据是否准确

在求解之前, 应该检查分析数据是否正确, 下面介绍需要检查的内容:

- Ø 单位是否统一
- Ø 单元类型及其选项是否合理
- Ø 材料性质参数输入是否正确, 考虑惯性时是否输入密度参数, 热应力分析时是否输入材料的热膨胀系数等
- Ø 单元特性实常数是否正确
- Ø 单元实常数和材料类型设置是否正确
- Ø 实体模型的质量特性是否正确 (GUI: Processor > Modeling > Operate > Calc Geom Items)
- Ø 实体模型是否存在缝隙, 不是一个整体
- Ø 壳单元的法线方向
- Ø 节点坐标系
- Ø 集中力、体积载荷是否施加合理
- Ø 面力方向是否正确
- Ø 温度场的分布和范围是否合理
- Ø 膨胀系数的参考温度与 ALPX 材料特性是否协调

上述项目的校验主要是查看 ANSYS Output Window 输出信息是否提示出错, 如果提示信息没有报错, 则上述项目基本正确, 如果中间出现提醒信息, 则需要查看前处理过程对应步骤是否正确。

3. 求解

求解前检查工作完成后, 开始求解。下面介绍求解过程中需要注意的事项:

1. 求解过程

- Ø 求解前保存数据库, 防止出错。
- Ø 在 Output 窗口中查看求解信息是否合理。
- Ø 开始求解 GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS。

2. 求解过程输出信息

求解过程中, 应该将 Output 窗口提到最前面, 跟踪求解过程信息。需要注意的信息有:

- Ø 模型的质量特性, 即模型质量是精确的, 质心和质量矩的值存在一点误差。
- Ø 单元矩阵系数, 当单元矩阵系数最大/最小值的比例大于 $1.0e8$ 时, 预示着模型中的材料性质、实常数或几何模型可能存在问题, 一旦比值过高, 求解就可能中途退出。
- Ø 模型尺寸和求解统计信息。

- Ø 汇总文件和大小。

3. 求解失败的原因

不是每次求解都可以得到结果。没有获得结果时需要分析为什么失败，找出原因，继续进行分析直到得到可信的结果。一般失败的原因有以下几点：

- Ø 约束不足，这也是最常见的问题。
- Ø 模型中存在非线性单元，整体或者部分结构出现崩溃或者“松脱”。
- Ø 材料属性参数输入有误，值可能为负值，如密度或瞬态热分析中的比热值。
- Ø 未约束铰接结构，如有两个水平运动的梁单元在数值方向没有约束。
- Ø 屈服，即当应力刚化效应为负值时，在载荷作用下，整个结构刚度弱化。如果刚度减小到零或者更小时，结构发生屈服，求解出现奇异。

2.5 结果后处理

求解完成后，进入后处理查看分析结果是否合理。所谓后处理就是查看和分析有限元的计算结果。首先，介绍两种后处理器及其作用，然后是介绍分析结果的校验。

2.5.1 结果后处理器的类型

ANSYS 针对不同类型的问题结果后处理提供了两种后处理器：通用后处理器和时间-历程后处理器。下面介绍两种后处理器的作用。

1. 通用后处理器（即 POST1）：只能查看模型的某一时刻的分析结果。
2. 时间-历程后处理器（即 POST26）：可以观察模型在不同时刻的分析结果，常用于处理瞬态和/或动力分析结果。

下面详细介绍两种后处理器的功能，首先介绍通用后处理器。

2.5.2 通用后处理器（POST1）

ANSYS 的通用后处理器功能非常强大，既可以显示图形，也可以进行复杂的数据列表处理（其菜单路径为：Main Menu > General Postproc）。通用后处理器查看计算结果之前，需要将结果文件导入数据库中。下面介绍通用后处理器的常用功能及其操作：

1. 显示结构形变

通过通用后处理器可以显示模型变形前后的图形，具体操作如下：

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Result > Deformed Shape

2. 显示参数等值线分布图

通过等值线图判断各个参数对结构的影响，显示分析结果数据等值线图操作如下：

GUI: Main Menu > General Postproc > Contour Plot

在弹出的对话框中选择需要显示的结果数据。

3. 显示变形动画

动画显示能查看模型在载荷作用下的内力变化过程，以图形方式显示分析计算结果。ANSYS 提供了强大的动画显示功能，不管是线性计算，还是非线性计算，动画显示操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Animate

通过 Animate 子菜单选择需要动画显示的结果数据。

4. 显示反作用力列表

在任何方向上，反作用力总是等于此方向上的载荷总和。通过显示反作用力可以检验分析结果是否合理，操作如下：

GUI: Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution

5. PowerGraphics 显示的特点

- Ø 快速重画，图形轮廓显示非常清晰。
- Ø 模型显示光滑，质感非常好。
- Ø 支持各种单元类型（Lines, Pipes, Elbows, Contace 等单元）和几何实体（Lines, Areas, 和 Volumes 等）显示。

6. 检查网格精度

由于网格密度对于结果精度影响非常大的，因此在后处理过程中应该检查求解所用网格精度是否足够。下面介绍网格精度检验的三种常用方法：观察法、误差估计法、网格加密结果对比法：

1. 观察法

观察法主要是通过肉眼观察应力分布、对比分析数据，验证结果是否合理：

- Ø 画出非平均（Unaveraged）应力等值线图，看应力变化是否平滑，是否有应力变化非常剧烈的区域，对应力变化剧烈区域的网格局部细化，重新求解。
- Ø 显示每个单元应力值，对比载荷数据及参考数据分析是否合理。

2. 误差估计法

这里介绍误差估计的概念和应用。

（1）误差估计的概念及其适用条件

下面介绍误差估计的概念及其适用条件：

- Ø ANSYS 通用后处理器包含网格离散误差估计

即借助一定的标准，通过误差估计评估网格密度是否合理。误差估计依据单元内边界的应力或热流的不连续性，是平均与为平均节点应力的插值。如果插值比较大，那么说明单元内部应力分布不均匀，分析结果精度不高，需要网格细化。

- Ø 误差估计的适用条件

任何标准都是有条件的，误差估计也是，下面介绍误差估计的适用条件。对于结构静力分析、线性稳态热分析及大多数的二维和三维实体和壳单元结构分析适用。

不符合上述条件或使用 PowerGraphics 时，ANSYS 自动关闭误差估计。退出

PowerGraphics, ANSYS 则自动重新评估误差。

(2) 误差估计功能

下面将一一介绍 ANSYS 通用后处理器提供的误差估计功能：

❶ 能量百分比误差估计

能量百分比误差是对所需单元的位移、应力、温度或热流密度误差的简单估计。通常误差值在 10%以下，如果不选择单元，只选择在节点上施加点载荷或者应力集中处的单元，误差值有时可以达到 50%甚至更高。

在绘制变形图时，百分比误差在图形右侧的文本中以 SEPC 表示，也可以通过：GUI: Postpro>List Result > Percent Error 操作列出误差。

❷ 应力偏差估计

画出所有单元的应力偏差图，可给出每个单元的应力误差值，应力误差值随应力类型不同（即平均应力和非平均应力）稍有不同，其操作如下：

GUI: Plot Results > Element Solu > Error Estimation > Stress Deviation

要检验某个位置的网格离散应力误差，可以列出或者绘制应力偏差等值线图。某个单元的应力偏差是此单元上全部节点的六个应力分量值与此节点的平均应力值之差的最大值。

❸ 能量误差估计

单元的另一种误差是能量误差，此项误差与单元上节点应力差值有关，是用于计算所选单元的能量百分比误差。能量误差的单位是能量单元。能量误差在通用后处理器的 Plot Results > Element Solu > Error Estimation > Energy Error 菜单中得到。

❹ 应力上下限估计

应力上下限可以帮助确定由于网格离散误差对模型应力最大值的影响。显示或者列出单元的应力上下限包括：估计上下 (SMXB) 和估计下限 (SMNB)。此法对于估计设定了一个确信范围：没有其他确凿证据就不能认为实际的最大应力低于 SMXB。

❺ P-方法估计

使用 p-方法进行结构分析，可以依靠 P 单元自动调整单元多项式阶数，达到所需收敛精度，其可信度与使用经验有关。

3. 网格加密结果对比法

这种方法常见用于陌生问题的分析。由于对问题估计不足或者经验不足，首先采用较为粗糙的网格进行分析，然后采用更细密的网格进行分析，对比两次的分析结果。如果，两次分析的结果相差较大，则说明网格密度不合理，需要加密网格，并再次对比后面的两次分析结果；如果，两次分析的结果相差不大（一般运行误差为 3~5%），则认为第一次分析所用网格密度合理。

2.5.3 时间-历程处理器 (POST26)

使用 POST26 可以比较不同变量之间的变化关系，比如可以用图形显示某一个节点处位移与对应载荷的关系，或者某一个节点处应变和对应的 TIME 值之间的关系。典型的 POST26 处理器使用过程如下：

1. 检查结果是否收敛

根据输出文件（Jobname.out）检查是否所有载荷步的分析结果都收敛，确保结果真实可靠。如果结果都收敛，进入 POST26，将结果数据导入数据库。

2. 定义参数变量

一般用户需要定义有限元模型中指定点的分析结果与时间等参数的关系，从而实现一个变量和了一个变量的相互关系。定义变量的菜单其操作如下：

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

在弹出的对话框中根据需要分析类型定义参数变量（详细使用参考第四章的任一分析实例）。

3. 显示变量间变化曲线

变量就是为通过图形显示变量做准备，定义完变量后，显示变量间变化关系，具体其操作如下：

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variables

4. 显示变量列表

图形显示有它的优点，也有不足，那就是数据不很精确，因此，需要显示详细的变量列表，具体其操作如下：

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > List Variables

5. 存储变量

存储变量意味着将结果文件写入数据库，用显示命令或者用 POST26 的数据运算命令（或者对应 GUI 操作）时，程序自动存储变量。表 2-1 列出了存储变量的命令和对应的 GUI 操作。

表 2-1 存储变量的命令及对应 GUI 操作

命 令	GUI 操作
PLVAR	Main Menu > TimeHist Postpro > Graph Variable
PRVAR	Main Menu > TimeHist Postpro > List Variable
ADD	Main Menu > TimeHist Postpro > Math Operations > Add
DERIV	Main Menu > TimeHist Postpro > Math Operations > Derivative
OUOT	Main Menu > TimeHist Postpro > Math Operations > Divide
VGET	Main Menu > TimeHist Postpro > Table Operations > Variable to Par
VPUT	Main Menu > TimeHist Postpro > Table Operations > Parameter to Var

6. POST26 的其他功能

在 POST26 中还可以根据需要进行变量间运算，由于应用不是非常广泛，这里不再介绍，

如果需要，请参考 ANSYS Help 文件。

2.5.4 评估分析结果

虽然 ANSYS 分析功能非常的强大，由于问题分析过程中可能会出现差错，不是所有的数据都是可靠的，因此需要识别那些数据是可靠的，那些是不可靠的：对于可靠的数据予以保留，对于不可靠的数据进行分析找到原因。这里主要介绍常用的验证方法。

1. 根据分析对象的基本行为进行评估

这主要是一些经验、实验数据还有一些基本尝试，借助这些知识对结果进行初步评估：

- Ø 重力方向总是数值向下的
- Ø 离心力总是沿径向向外的
- Ø 物体受热一定膨胀（特殊材料除外）
- Ø 没有那种材料可以抗拒 1000 000 psi 的应力不发生屈服
- Ø 轴对称物体总是没有为零的环向应力
- Ø 弯曲载荷造成的应力使一侧受压一侧受拉

如果只有一个载荷施加在模型上，比较容易判断分析数据的可靠性；但是如果载荷数目比较多，进行整体验证就不容易了，比较简便的方法就是单独施加一个或者几个载荷分别进行检验，然后施加所有载荷进行分析、评估。

2. 根据输出窗口信息进行评估

计算过程中注意输出窗口的输出，或者将输出信息写入指定文件然后查看输出信息是否揭示了几何模型、材料属性（如密度）和实常数方法存在的输入错误。

3. 根据变形、温度和应力进行评估

通过这些数据结合专业知识判断结果数据是否可靠。需要评估的有：

- Ø 确认施加在模型上的载荷是否合理
- Ø 确认模型的运动行为与预期是否相符合，一般通过约束节点位移判断
- Ø 确认位移和应力的分布与期望是否符合，或者参考已有的解析解

4. 根据模型的整体或者部分反作用力或节点力进行评估

需要注意的参数有模型的平衡条件是否满足：

- Ø 模型所有反作用力是否与所受载荷外力总和相等
- Ø 约束节点的水平方向反作用力是否与载荷水平方向分力平衡
- Ø 所有约束节点的反作用力矩是否与所施加的载荷平衡
- Ø 任意具备单元子集的节点力是否与此部分的已知载荷平衡（如图 2-26 所示）



图 2-26 力的平衡条件判断

2.5.5 调试可疑的分析结果

当出现可疑分析结果时，不能轻易的舍弃。事实证明看似不起眼的数可能会影响很多因素。通过调试可疑结果，找到问题的源头对 ANSYS 的理解就更深一步，同时也是提高有限元分析水平的好机会！发现可疑结果后，下面介绍如何调试：

Ø 首先找类似问题作为参考，这个参考问题必须是经验证后完全正确的，而且已经被完全理解。

Ø 一步步的调试数据，确保每步数据均准确无误，如果数据还没有改观，那调整模型或者求解控制参数，逐步逼近。通过模型修正和求解参数修正缩小分析范围，逐渐找到问题的根源。

2.6 本章小结

通过本章学习需要了解以下内容：

1. 有限元基础知识

需要了解有限元的基本概念，有限元分析的大致步骤，及其如何在 ANSYS 上实现。

2. 前处理

需要了解坐标系和工作平面的工作原理和使用方法；了解主要的布尔操作及其功能，并能够使用布尔操作进行简单的图形操作；了解实体模型/有限元模型的创建方式及其来源方式，了解 ANSYS 与其他软件的数据接口；了解划分有限元模型的几种方式及每种方式的适用性，特别注意网格细化的方式及其应用；知道如何修改有限元模型。

3. 加载并求解

了解载荷的广义及狭义的概念，了解载荷的主要类型及每种载荷类型的加载方式；了解实体模型加载与有限元加载的优缺点；了解 ANSYS 软件提供的主要几种类型的求解器，并了解每种求解器的大致适用范围，可以正确设置每种求解选项。

4. 查看分析结果

了解两种后处理器的适用范围及其常用功能，掌握对分析结构进行各种后处理的技能；非常重要是如何校验分析结果，如何调试可疑的分析结果。

2.7 习题

1. 概述有限元分析的主要步骤及每个步骤的主要作用。
2. 概述实体建模的主要方式及 ANSYS 实体模型的主要来源方式。

-
3. 概述划分网格的主要控制方式及每种方式的适用范围。
 4. 概述细化网格的主要方式并举例。
 5. 概述 ANSYS 载荷类型及其加载方式。
 6. 概述 ANSYS 主求解器类型及其适用范围。
 7. 概述 ANSYS 主要后处理方式及其每种方式的主要主要功能。
 8. 概述主要的结果评估方式及可疑分析结果的调试方式。