

第六章 热分析

本章要点:

- Ⅰ 热分析的基础知识, 即热分析的特点、ANSYS 热分析的主要类型及热载荷/边界的定义。
- Ⅰ 稳态传热的基础知识, 热分析单元及稳态传热分析的主要步骤及每步分析中需要注意事项, 实例讲解稳态热分析的过程。
- Ⅰ 瞬态传热的基础知识, 稳态传热分析的主要步骤及每步分析中需要注意事项(特别是求解及求解选项设定), 实例讲解瞬态传热分析的过程。简单的相变问题的基础知识。
- Ⅰ 辐射传热的基础知识, 辐射传热分析的主要步骤及每步中与传统热分析的差异。
- Ⅰ 耦合场的基础知识, 常见的耦合场求解方法及其每种方法的优缺点, 热应力分析的主要步骤及与通常非耦合场分析的差异。

学好、用好 ANSYS 热分析功需要首先了解热分析的基础知识, 然后通过加强专业学习的同时提高实际动手的能力, 在实践中提高使用 ANSYS 进行热分析的能力。下面首先介绍热分析的基础知识。

6.1 热分析简介

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其它热物理参数, 如热量的获取或损失、热梯度、热流密度(热通量)等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色, 如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。

6.1.1 ANSYS 热分析特点

ANSYS 热分析有以下几个特点:

Ø ANSYS 功能组件热分析能力

在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 五种产品中包含热分析功能, 其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。

Ø ANSYS 热分析原则

ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程, 用有限元法计算各节点的温度, 并导出其它热物理参数。

Ø ANSYS 热分析类型

ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外, 还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

6.1.2 ANSYS 热分析的分类

ANSYS 热分析分为两大类, 即传统的热分析和热耦合分析。

1. ANSYS 热分析

依据温度场与时间的变化关系，ANSYS 热分析可以分为以下两种：

1. 稳态传热

稳态传热就是系统的温度场不随时间变化。

2. 瞬态传热

瞬态传热，顾名思义就是系统的温度场随时间明显变化

2. 热耦合分析

耦合分析，就是将热分析与其他类型的分析结合起来进行分析。ANSYS 可能进行的热耦合分析包括以下几个方面：

- Ø 热-结构耦合分析
- Ø 热-流体耦合分析
- Ø 热-电耦合分析
- Ø 热-磁耦合分析
- Ø 热-电-磁-结构耦合分析

6.1.3 热分析边界条件及初始条件

对于 ANSYS 热分析而言，其提供的边界条件或者初始条件可以分为以下其中：温度、热流率、热流密度、对流、辐射、绝热和生热。

6.1.4 ANSYS 热分析误差估计

对于任何分析都不可能决定精确，这要求在进行分析时进行误差评估，尽量减小误差。ANSYS 热分析误差估计主要应用于以下几种情况：

- Ø 只能评估网格密度因素引起的误差
- Ø 只适合单温度自由度单元（SOLID 或者 SHELL 单元）
- Ø 仅对线性、稳态热分析有效
- Ø 通过自适应网格划分可以减少误差
- Ø 热误差估计基于单元边界热流密度不连续

6.2 稳态传热分析

6.2.1 稳态传热简介

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态传热分析以前，进行稳态热分析用于确定初始温度分布。

稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数

6.2.2 热分析单元简介

热分析涉及到的单元有大约 40 种，其中纯粹用于热分析的有 14 种单元：

1. 线性单元

LINK32 两维二节点热传导单元

LINK33 三维二节点热传导单元

LINK34 二节点热对流单元

LINK31 二节点热辐射单元

2. 二维实体单元

PLANE55 四节点四边形单元

PLANE77 八节点四边形单元

PLANE35 三节点三角形单元

PLANE75 四节点轴对称单元

PLANE78 八节点轴对称单元

3. 三维实体单元

SOLID87 六节点四面体单元

SOLID70 八节点六面体单元

SOLID90 二十节点六面体单元

4. 壳单元

SHELL57 四节点

5. 点单元

MASS71

有关各种单元的详细解释，请借助 ANSYS Help。

6.2.3 稳态传热分析的主要步骤

和任何类型问题分析过程大致类似，ANSYS 热分析可分为以下三个步骤，首先是建立有限元模型，然后施加载荷并求解，最后是查看分析结果。

1. 建立有限元模型

建模过程与一般类型问题分析过程大致一样：

1. 分析前的准备工作

建模前的准备工作主要有：建立文件文件夹，选择文件名，添加标题并选择合理的单位。

热分析建议采用国际单位制。

2. 进入前处理器

3. 选择热分析单元类型，定义单元选项。

4. 定义实常数

5. 定义材料热性能参数

对于稳态传热分析只需要定义材料的导热系数。材料的导热系数可以是恒定的，也可以是随温度变化的。

6. 创建实体模型

7. 划分网格，建立有限元模型

2. 施加载荷并求解

这部分定义热分析所需的条件，为求解做好准备。下面介绍稳态热分析的分析选项及其设定：

1. 选择分析类型/重新启动

命令：ANTYPE, STATIC, NEW

GUI: Main menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Steady-state

选择稳态分析。另外，如果前面分析没有完成，需要重新启动：

命令：ANTYPE, STATIC, REST

GUI: Main menu > Solution > Analysis Type > Restart

增加约束继续上一次分析，主要是从稳态分析进入瞬态分析需要 Restart。

2. 施加载荷

对于稳态热分析，可以在可以直接在实体模型或单元模型上施加五种载荷（边界条件）。

下面详细介绍各种载荷及其施加方式：

Ø 恒定温度边界

命令：D

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature

通常通常作为自由度约束施加于温度已知的边界上。

Ø 热流率

命令：F

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature

热流率作为节点集中载荷，主要用于线单元模型中（通常线单元模型不能施加对流或热流密度载荷），如果键入的值为正，代表热流流入节点，即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上则 ANSYS 读取温度值进行计算。

注意：

如果在实体单元的某一节点上施加热流率，则此节点周围的单元要密一些，在两种导热系数差别很大的两个单元的公共节点上施加热流率时，尤其要注意。此外，尽可能使用热生成或热流密度边界条件，这样结果会更精确些。

Ø 对流边界

命令：SF

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature

对流边界作为面载荷施加于实体的外表面，计算与流体的热交换，它仅可施加于实体和壳模型上，对于线模型，可以通过对流线单元 LINK34 考虑对流。

Ø 热流密度

命令：F

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Heat Flow

热流密度也是一种面载荷。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOTRAN CFD 计算得到时，可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果键入的值为正，代表热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。热流密度与对流可以施加在同一外表面，但 ANSYS 仅读取最后施加的面载荷进行计算。

❶ 生热率

命令：BF

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Define Loads > Apply > Thermal > Heat Generat

生热率作为体载施加于单元上，可以模拟化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。

4. 定义载荷步选项

对于对于一个热分析，可以确定普通选项、非线性选项以及输出控制。

(1) 普通选项

下面介绍载荷步的各个选项及其设定方式：

❶ 时间选项

命令：TIME

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

选项虽然对于稳态热分析，时间选项并没有实际的物理意义，但它提供了一个方便的设置载荷步和载荷子步的方法。

❶ 载荷子步选项

命令：NSUBST

GUI: Main Menu > Solution > Loads > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

选项用于设定每载荷步中子步的数量或时间步大小。对于非线性分析，每一载荷步需要多个子步。

❶ Ramped 或 Stepped 选项

命令：KBC

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps

主要是定义载荷变化情况。如果定义阶越 (stepped) 选项，载荷值在这个载荷步内保持不变；如果为递进 (ramped) 选项，则载荷值由上一载荷步值到本载荷步值随每一子步线性变化。

(2) 非线性选项

下面介绍载荷步分析选项中的非线性选项及其设定方式：

❶ 迭代次数选项

命令：NEQIT

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter

设置合理的迭代次数，在求解精度与速度之间得到协调。

❶ 自动时间步长选项

命令：AUTOTS

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls

对于非线性问题分析，激活自动时间步长，保证求解的精度和稳定性。

Ø 收敛误差选项

命令: NCNV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > advanced nl

使求解器可根据温度、热流率等检验热分析的收敛性

Ø 迭代次数选项

命令: NCNV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > advanced nl

如果在规定的迭代次数内，达不到收敛，ANSYS 可以停止求解或到下一载荷步继续求解

Ø 线性搜索选项

命令: LNSRCH

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls

设置本选项可使 ANSYS 用 Newton-Raphson 方法进行线性搜索。

Ø 预测矫正选项

命令: PRED

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > nonlinear

选项可激活每一子步第一次迭代对自由度求解的预测矫正。

(3) 打印输出选项

下面介绍载荷步选项中的输出选项及其设定方式:

Ø 控制打印输出选项

命令: OUTPR

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Solu Printout

本选项可将任何结果数据输出到 Jobname.out 文件中。

Ø 控制结果文件选项

命令: OUTRES

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

选项控制 Jobname.rth 的内容。

5. 确定分析选项

确定分析选项就是选项稳态热分析所用的求解器，下面介绍求解选项及其设定方式:

Ø Newton-Raphson 选项

命令: NROPT

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Options

此项仅对非线性分析有用。

Ø 选择求解器选项

命令: EQSLV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Options

选择可选择如下求解器中一个进行求解: Frontal solver (默认)、JCG solver、ICCG solver、PCG solver 和 Iterative。

注意:

热分析可选用 Iterative 选项进行快速求解, 但如下情况除外:

- (1) 热辐射分析
- (2) 热分析包含 SURF19 或 SURF22 或超单元
- (3) 相变分析
- (4) 需要 restart an analysis

Ø 确定绝对零度选项

命令: TOFFST

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Options

在进行热辐射分析时, 要将目前的温度值换算为绝对温度。如果使用的温度单位是摄氏度, 此值应设定为 273; 如果使用的是华氏度, 则为 460。

6. 保存数据库

命令: SAVE

GUI: Tool bar > SAVE_DB

7. 求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS

3. 观察结果

ANSYS 将热分析的结果写入 *.rth 文件中, 文件中包含基本数据 (节点温度) 及其派生数据 (节点及单元的热流密度、热梯度, 单元热流率, 节点的反作用热流率等)。

对于稳态热分析, 可以使用 POST1 进行后处理。常用的 POST1 后处理操作步骤如下所示:

1. 读入载荷步和子步

命令: SET

GUI: Main Menu > General Postproc > By Load Step

2. 显示温度等值线图

命令: PLNSOL, PLESOL, PLETAB 等

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu 或 Element Solu 或 Elem

Table

通过此操作显示模型温度场等值线图。

3. 显示温度场矢量图

命令: PLVECT

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Pre-defined or Userdefined

4. 显示温度列表

命令: PRNSOL, PRESOL, PRRSOL 等

GUI: Main Menu > General Postproc > List Results > Nodal Solu, Element Solu, Reaction

Solu

6.2.4 稳态传热分析实例

1. 教学目的

通过下面两个稳态传热实例分析，清晰了解稳态传热分析的过程，加深印象，具备分析简单的稳态传热问题的能力。

首先是一个非常简单的传热问题，然后介绍具有较为复杂边界条件的传热分析。

2. 简单热传导分析

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：稳态热分析。

单元类型：PLANE55

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作；施加热载荷；显示模型温度等值线图；基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件：在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Thermal Analysis 分析知识，在 ANSYS Elements Reference 部分了解 PLANE55 单元的详细资料。

热传导模型如图 6-1 所示。材料的热传导率为 $10 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ，材料假定无限长。现在需要分析其温度场分析情况。

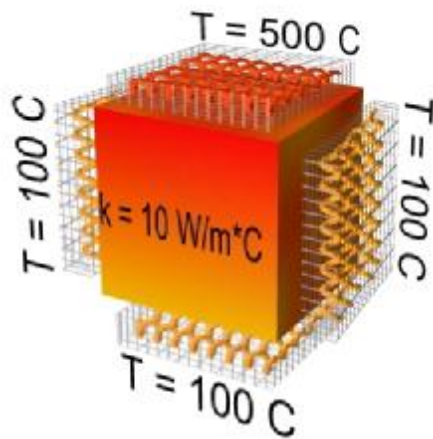


图 6-1 稳态热分析模型

建立有限元模型

下面按照通常的传热分析的前处理过程进行介绍。

1. 添加标题

GUI: Utility Menu > Change title

键入标题名: Simple Conduction Example

命令: /title, Simple Conduction Example

2. 建立几何模型

通过对角点生成矩形, 操作如下:

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

矩形参数如下:

Xcorner=0

Ycorner=0

Width=1

Height=0

命令: BLC4, 0, 0, 1, 1

3. 选择单元

选择热分析实体单元, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

单击 Add 按钮, 选择 Thermal Solid, Quad 4Node 55, 即 PLANE55 单元。

命令: ET, 1, PLANE55

PLANE55 单元具有 4 个节点, 每个节点只有一个自由度 (温度)。PLANE55 单元只能用于二维稳态或者瞬态热模型分析。

4. 定义材料属性

定义热传导材料参数, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal > Conductivity > Isotropic >

KXX = 10

KXX 表示热传导率

命令: MP, KXX, 1, 10

5. 设定网格尺寸

GUI: Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Areas

在弹出对话框中, 面网格边长栏键入 “0.05”。

命令: AESIZE, ALL, 0.05

6. 划分网格

采用自由 (Free) 网格划分, 操作如下:

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

施加载荷并求解

1. 选择分析类型

热分析为稳态分析, 因此分析类型选择:

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Steady-State

命令: ANTYPE, 0

2. 定义热约束/热载荷

对于这个热传导问题，约束通过边界温度场定义，比如对流、热流动、熔化、生热或者辐射等，由于实体的四个边上的温度事先已经确定，这里只需定义恒定温度边界：

(1) 定义热载荷

注意到结构选项均不可选，这是因为选择了 PLANE55 单元的缘故。

(2) 定义热约束

在节点上定义温度，首先进入 Apply TEMP on Nodes 对话框，操作如下：

GUI: Solution>Define Loads>Apply>Thermal > Temperature > On Nodes

单击 Box 选项(如图 6-2 所示)，用鼠标框住实体最顶端的边。弹出 Apply TEMP on Nodes 对话框(如图 6-3 所示)。



图 6-2 采用 box 方式选择

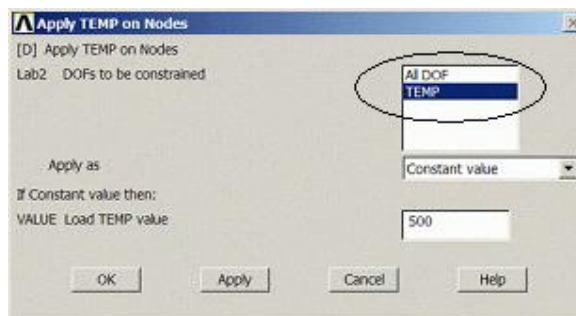


图 6-3 定义恒定温度边界

依图 6-3 施加温度场边界条件。定义顶边温度恒定为 500℃。依照通用的方法，定义其他三个边，每边的温度均恒定为 100℃。定义完模型的温度边界后，在所定义边界上出现橙色小三角箭头。

3. 求解

其操作如下：

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

查看分析结果

通过 POST1 察看结果，即查看模型温度场：

显示模型温度场，操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu ... > DOF solution

Temperature TEMP

得到模型温度场（如图 6-4 所示）。

命令: PLNSOL, TEMP, , 0,

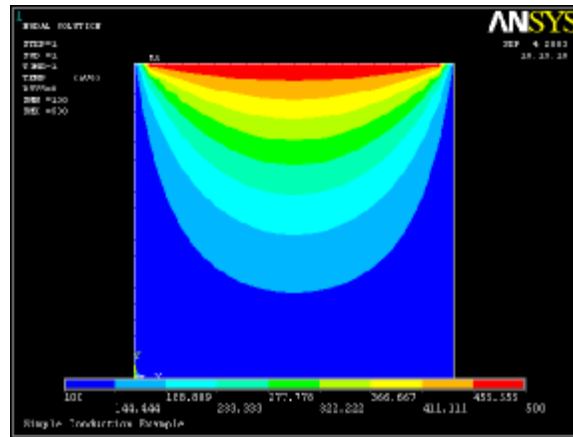


图 6-4 模型温度等值线图

注意：

从图上显示出所施加的边界条件，在模型两个顶角温度固定为 100℃。回想定义边界条件的过程，首先，定义顶边温度场，然后是剩下的侧边和底边的温度场。所以，顶角首先被定义为 500℃，然后在定义侧边时顶角的温度约束被重新定义。减小网格尺寸可以使这种效果减弱，然而，任何人从事温度场分析时都要非常注意在边角分析结果的局限性。

命令流求解

ANSYS 命令流（ANSYS Command Listing）：

```
/title, Simple Conduction Example      !添加标题
/PRER7                                  !进入前处理器
!定义几何形状
*set, length=1.0
*set, height=1.0
blc4, 0, 0, length, height             !定义矩形 -左下角顶点，宽，高
```

ET, 1, PLANE55	!选择热分析单元
MP, KXX, 1, 10	!定义热传导系数10 W/mC
ESIZE, length/20	!每边划分网格数
AMESH, ALL	!划分网格
FINISH	!退去前处理
/SOLU	!进入求解
ANTYPE, 0	!稳态热分析
!定义温度边界条件	
NSEL, S, LOC, Y, height	!选择顶点
D, ALL, TEMP, 500	!定义恒定温度场
NSEL, ALL	!选择线上所有节点
NSEL, S, LOC, X, 0	!选择剩余三边节点
NSEL, A, LOC, X, length	
NSEL, A, LOC, Y, 0	
D, ALL, TEMP, 100	!定义恒定温度
NSEL, ALL	
SOLVE	!求解
FINISH	!退出求解
/POST1	!进入通用后处理
PLNSOL, TEMP, , 0,	!显示温度场

实例总结

1. 关于建模的总结

通过实例学习，需要掌握基本的建模操作，可以定义简单的矩形。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握简单温度载荷/约束的定义，可以定义恒定温度边界，这时稳态、瞬态传热分析和热-应力耦合分析的基础。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握查看温度等值线图的操作，可以根据分析问题的类型查看模型温度场，并了解不同的边界定义方式对于分析结果的影响，本例为需要了解的就是在节点上施加温度约束的优先等级，即第一次定义的温度约束会被随后定义的温度约束覆盖。

4. 具有复杂边界条件的传热分析

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：稳态热分析。

单元类型: PLANE55

ANSYS 功能示例: 实体建模包括基本的建模操作; 施加对流约束; 显示模型温度等值线图; 基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件: 在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Thermal Analysis 分析知识, 在 ANSYS Elements Reference 部分了解 PLANE55 单元的详细资料。

这时一个简单的热传导问题, 具有复杂的边界条件, 其边界上有对流、辐射还有绝缘等不同情况。复杂边界条件热传导模型边界情况如图 6-5 所示。

注意:

实体模型假定为无限长。

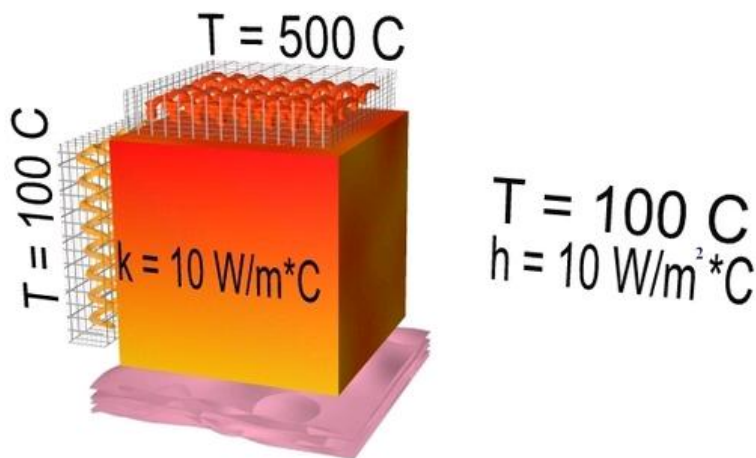


图 6-5 复杂边界条件热传导模型

建立有限元模型

下面介绍建模过程, 与上例大致一样, 下面介绍建立有限元模型的主要步骤:

1. 添加标题

其操作如下:

GUI: Utility Menu > Change title

键入标题名: Simple Conduction Example

命令: /title, Simple Conduction Example

2. 创建实体模型

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

矩形参数如下:

Xcorner=0

Ycorner=0

Width=1

Height=0

命令: BLC4, 0, 0, 1, 1

3. 选择单元

选择热分析实体单元，操作如下：

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

选择 PLANE55 单元。

命令: ET, 1, PLANE55

4. 定义材料属性

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal > Conductivity > Isotropic >

KXX = 10

命令: MP, KXX, 1, 10

5. 设定网格尺寸

GUI: Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Areas

在弹出对话框中，面网格边长栏键入“0.05”。

命令: AESIZE, ALL, 0.05

6. 划分网格

其操作如下：

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

命令: Amesh, All

施加载荷并求解

下面先介绍载荷施加及边界条件的定义过程，最后是求解。

1. 选择分析类型

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Steady-State

命令: ANTYPE, 0

2. 定义热约束/热载荷

模型中有两个边为稳态温度场，另外两个边为对流传热。下面分别进行定义。首先定义顶边。

(1) 定义稳态热边界场

其操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Lines

选择模型顶边，将其温度恒定为 500℃。依照同样的方法定义另外一个边使其温度恒定为 100℃。

(2) 定义对流边界条件

定义对流边界，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Convection > On Lines

选择模型右侧边，弹出 Apply CONV on Lines 对话框（如图 6-6 所示）。取对流系数为 10 W/m²*C，周围环境温度为 100℃。

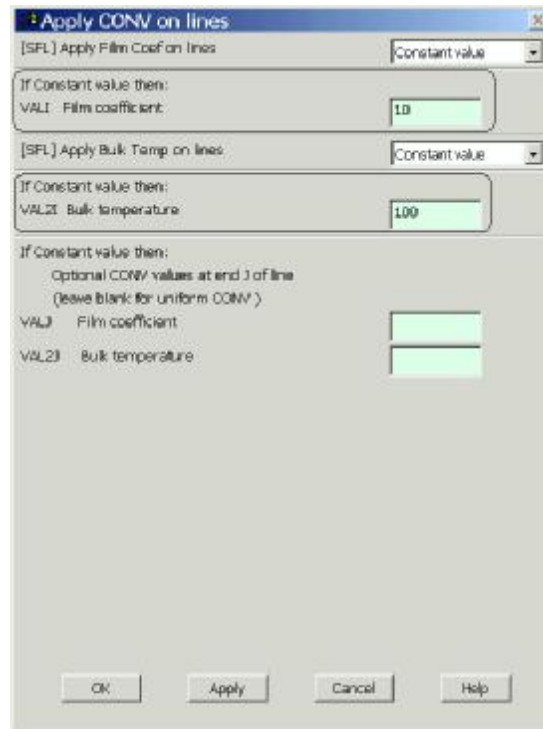


图 6-6 定义对流边界

注意：

VALJ 和 VAL2J 两栏不用填写，因为沿边界均匀对流传热。有关 VALJ 和 VAL2J 详细信息请参考 ANSYS Help 文件。

(3) 定义绝缘边界条件

定义绝缘边界，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Convection > On Lines

选择实体底边，在对话框中的恒定膜层散热系数（constant Film coefficient (VAL1)）栏中键入“0”。恒定膜层散热系数为零表示完全取消此边的对流传热。因此，此边定义为绝热边界。定义完热边界条件后模型如图 6-7 所示。

注意：

不需要定义环境（Bulk/Ambient）温度。

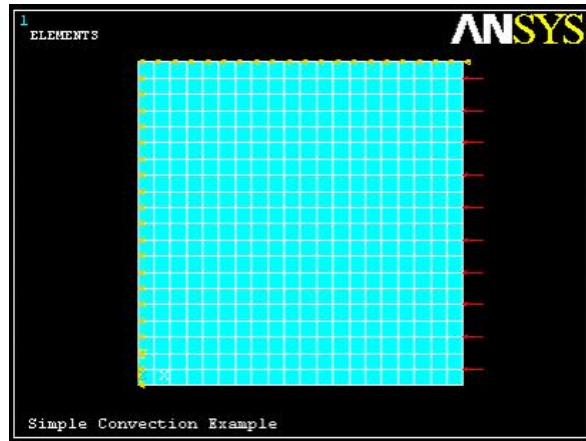


图 6-7 模型热边界条件

3. 求解

其操作如下：

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

查看分析结果

这里主要是通过 POST1 查看稳态热分析的温度场，操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Contour Plot > Nodal Solu > DOF solution,

Temperature TEMP

得到模型温度场（如图 6-8 所示）。

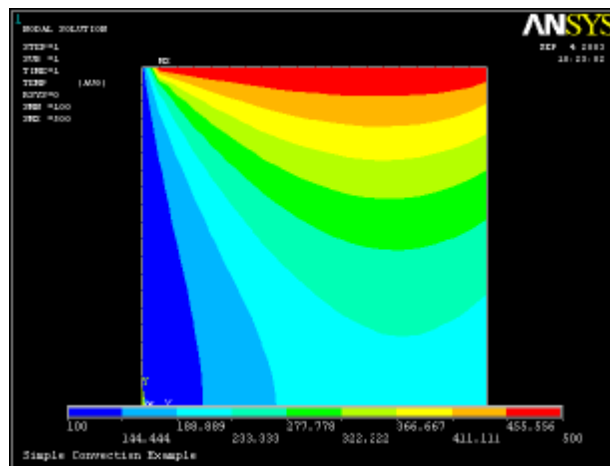


图 6-8 模型温度场

命令流求解

ANSYS 命令流 (ANSYS Command Listing):

```

/title, Simple Convection Example !添加标题
/PREP7 !进入前处理
!创建实体模型
!定义参数
length=1.0
height=1.0
!参数定义完毕
blc4,0,0,length,height !定义实常数- 左下角顶点, 宽, 高
!划分网格
ET,1, PLANE55 !T选择热分析单元
MP,KXX,1,10 !定义热传导系数 10 W/mC
MAT,1 !1# 材料
TYPE,1 !1# 单元
ESIZE,length/20 !定义每条边单元划分数
AMESH,ALL !划分单元
FINISH !退出前处理
/SOLU !进入求解器
ANTYPE,0 !稳态热分析 (分析类型)
!定义问题边界条件
NSEL,S,LOC,Y,height !顶面节点
D,ALL,TEMP,500 !恒定温度场
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0 !其他三边节点
D,ALL,TEMP,100 !恒定温度场
NSEL,ALL
!定义对流边界条件
NSEL,S,LOC,X,length !右手边
SF,ALL,CONV,10,100 !恒定温度场
NSEL,ALL
!定义绝热边界
NSEL,A,LOC,Y,0 !选择底边
SF,ALL,CONV,0 !设置为绝热
NSEL,ALL
SOLVE !求解
FINISH !退出求解
/POST1 !进入通用后处理
PLNSOL,TEMP,,0, !显示模型温度场

```

实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作；掌握热传导率的定义方法，可以根据已知条件定义材料的热传导率，这是热分析所有类型都必须的。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握定义复杂温度载荷/约束的操作，可以根据不同的温度边界类型定义模型的对流边界、绝热边界和恒定温度边界，为以后瞬态传热分析和热-应力耦合分析的温度边界设定打好基础；了解 Apply on Line 与 Apply on Nodes 的区别。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握温度等值线图的提取操作，可以根据分析的需要查看模型的恒定温度场。

6.3 瞬态传热分析

6.3.1 瞬态传热分析简介

瞬态传热分析用于计算一个系统的随时间变化的温度场及其它热参数。在工程上一般用瞬态传热分析计算温度场，并将之作为热载荷进行应力分析。

瞬态传热分析的基本步骤与稳态热分析类似，主要的区别是瞬态传热分析中的载荷是随时间变化的。为了表达随时间变化的载荷，首先必须将载荷—时间曲线分为载荷步。载荷—时间曲线中的每一个拐点为一个载荷步，如图 6-9 所示。对于每一个载荷步，必须定义载荷值及时间值，同时必须选择载荷步为 Ramped 方式变化或 Stepped 方式变化。

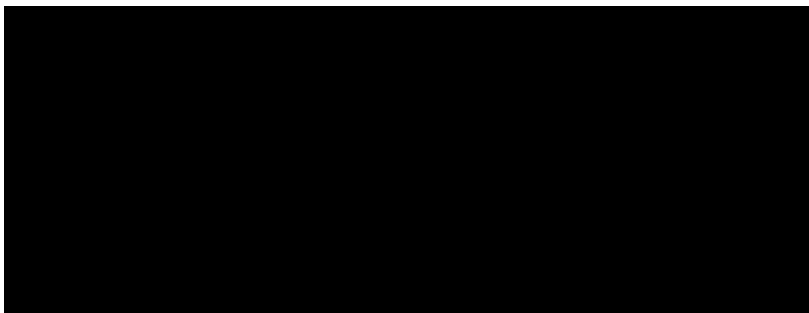


图 6-9 载荷及其载荷步

6.3.2 瞬态传热分析中的单元及命令

瞬态传热分析中使用的单元与稳态热分析相同。要了解每个单元的详细说明，请参阅《ANSYS Element Reference Guide》。要了解每个命令的详细功能，请参阅《ANSYS Command Reference Guide》。

6.3.3 ANSYS 瞬态传热分析的主要步骤

ANSYS 瞬态传热分析与任何类型问题分析过程大致类似，其过程可以分为三个主要步骤：首先是建立有限元模型，然后施加载荷并求解，最后是查看分析结果。下面详细介绍瞬态传热分析的主要步骤：

1. 建立有限元模型

一般瞬态传热分析中, 定义材料的热性能时要定义导热系数、密度及比热, 其余建模过程与稳态热分析类似。

2. 施加载荷并求解

1. 选择分析类型

进行瞬态传热分析需要首先需要定义分析类型及其相关选项。下面介绍分析类型及其选项的设定:

Ø 进行第一次分析或者重新进行分析

命令: ANTYPE,TRANSIENT,NEW

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient

Ø 延续上一次分析

命令: ANTYPE,TRANSIENT,REST

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Restart

通过此项可以添加其他载荷等。

2. 定义瞬态传热分析的初始条件

瞬态传热分析的初始条件分为两种情况: 其一, 初始温度场已知; 其二, 初始温度场未知。下面详细介绍两种初始条件的设定。

(1) 已知初始温度场

如果初始温度场是已知的, 则定义过程比较简单, 定义过程如下:

Ø 定义均匀温度场

命令: TUNIF

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

Temp

如果已知模型的起始温度是均匀的, 可设定所有节点初始温度。

Ø 设定参考温度

命令: TREF

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp

如果不在对话框中键入数据, 则默认为参考温度, 参考温度的值默认为零。

Ø 设置节点温度

命令: D

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Nodes

注意:

设定均匀的初始温度, 与设定节点的温度(自由度)不同。初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效; 而设定节点温度将保持贯穿整个瞬态分析过程, 除非通过删除此约束。

Ø 删除节点温度约束

命令: DDELE

GUI: Main Menu > Solution > Constraints > Delete > On Nodes

删除不需要的温度约束。

❶ 设定非均匀的初始温度

命令: IC

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define

在瞬态传热分析中, 节点温度可以通过此项设定为不同的值。

(2) 初始温度场未知

如果初始温度场是不均匀的且又是未知的, 就必须首先作稳态热分析确定初始条件, 下面介绍分析选项的设定:

1) 施加载荷 (如已知的温度、热对流等)

2) 关闭时间积分

命令: TIMINT, OFF

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration

3) 设定一个只有一个子步的, 时间很小的载荷步 (例如 0.001)

命令: TIME

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

4) 写入载荷步文件

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File

或先求解:

命令: VE

GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS

注意:

在第二载荷步中, 要删去所有设定的温度, 除非这些节点的温度在瞬态分析与稳态分析相同。

3. 定义载荷步选项

载荷步选项主要分为普通选项 (线性及非线性都常用的选项) 和非线性选项。下面介绍普通选项及非线性选项的设定:

(1) 普通选项设定

首先介绍普通选项:

❶ 时间选项

命令: TIME

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

本选项设定每一载荷步结束时的时间。

❷ 载荷子步数或时间增量选项

命令: NSUBST 、 DELTIM

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

对于非线性分析, 每个载荷步需要多个载荷子步。时间步长的大小关系到计算的精度。步长越小, 计算精度越高, 同时计算的时间越长。根据线性传导热传递, 可以

按如下公式估计初始时间步长：

$$ITS = \delta^2 / 4a$$

其中 δ 为沿热流方向热梯度最大处的单元的长度， a 为导温系数，它等于导热系数除以密度与比热的乘积（ $a = \kappa / \rho c$ ）。

Ø 载荷步进类型选项

如果载荷在这个载荷步是恒定的，需要设为阶越选项；如果载荷值随时间线性变化，则要设定为渐变选项：

命令：KBC

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps

介绍完普通选项后，下面介绍非线性选项。

（2）非线性选项

非线性选项常用选项如下：

Ø 迭代次数选项选项

命令：NEQIT

GUI：Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter

每个子步默认的次数为 25，这对大多数非线性热分析已经足够。

Ø 自动时间步长选项

命令：AUTOTS

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls

打开后求解过程中将自动调整时间步长。

Ø 时间积分选项

命令：TIMINT

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration

如果将此选项设定为 OFF，将进行稳态热分析。

4. 输出选项

所有分析类型都是通过输出选项设定分析结果的输出，下面介绍瞬态热分析的输出选项设定：

Ø 控制打印输出

命令：OUTPR

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Solu Printout

本选项可将任何结果数据输出到 Jobname. .out 文件中。

Ø 控制结果文件选项

命令：OUTRES

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

此项控制 Jobname.rth 的内容。

3. 备份数据库

4. 求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu > Solution > Current LS

5. 查看分析结果

ANSYS 提供两种后处理方式: POST1, 可以对整个模型在某一载荷步(时间点)的结果进行后处理; POST26, 可以对模型中特定点在所有载荷步(整个瞬态过程)的结果进行后处理。下面分别介绍两种后处理的主要功能及其操作。首先介绍 POST1 后处理。

1. POST1 后处理

(1) 读入结果数据

命令: SET

GUI: Main Menu > General Postproc > Read Results > By Time/Freq

进入 POST1 后, 可以读出某一时间点的结果。如果设定的时间点不在任何一个子步的时间点上, ANSYS 会进行线性插值。

此外还可以读出某一载荷步的结果:

GUI: Main Menu > General Postproc > Read Results > By Load Step

(2) 查看分析结果

然后就可以采用与稳态热分析类似的方法, 对结果进行彩色云图显示、矢量图显示、打印列表等后处理, 这里不再详述。下面介绍 POST26 后处理。

2. POST26 后处理

(1) 定义参数变量

命令: NSOL or ESOL or RFORCE

GUI: Main Menu > TimeHist Postproc > Define Variables

(2) 绘制变量随时间变化曲线

命令: PLVAR

GUI: Main Menu > TimeHist Postproc > Graph Variables

(3) 显示变量结果列表

命令: PRVAR

GUI: Main Menu > TimeHist Postproc > List Variables

此外, POST26 还提供许多其它功能, 如对变量进行数学操作等。

6.3.3 相变问题

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题, 例如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态的问题, 下面介绍进行相变分析时应该注意的事项:

- Ø 相变问题需要考虑熔融潜热

考虑相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热（如图 6-10 所示）。



图 6-10 相比过程焓-温度变化曲线

焓的单位是 J/m^3 ，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int rc(T)dT$$

Ø 设置足够小的时间步长

求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON；

Ø 尽量选项低阶单元

选用低阶的热单元，如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，需单元选项 KEYOPT (1) 设置为 1，操作如下：

命令：Keyopt (1) =1

GUI: Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Options > Specific heat matrix > Diagonalized

Ø 设置合理的 THETA 值

在设定瞬态积分参数时，将 THETA 值设置为 1（默认为 0.5），操作如下：

命令：TINTP

GUI: Main Menu > Preprocessor > Loads > LoadStepOpts > Time/Frequenc > Time Integration > THETA

Ø 激活线性搜索

线性搜索将有助于加速相变问题的求解，操作如下：

命令：LNSRCH

GUI: Main Menu > Preprocessor > Loads > Load Step Opts > Nonlinear > Line Search

6.3.4 瞬态传热分析实例

1. 教学目的

通过实例学习，真实的感受瞬态传热分析的过程，掌握瞬态传热分析的技术。

2. 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：瞬态传热分析。

单元类型：PLANE55

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作；定义比热容；施加瞬态热载荷；设置瞬态热载荷分析选项；显示模型温度等值线图；显示节点温度随时间变化曲线；基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件：在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Thermal Analysis 分析知识，在 ANSYS Elements Reference 部分了解 PLANE55 单元的详细资料。

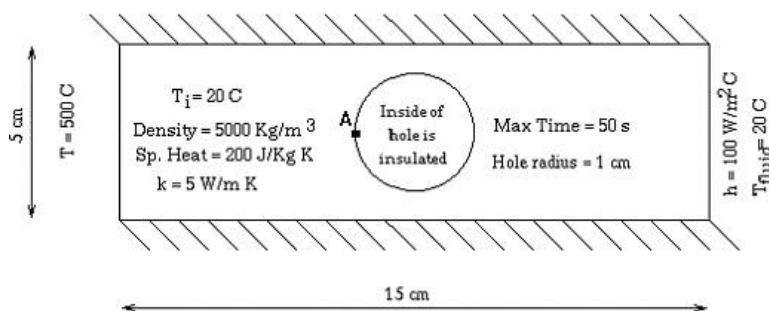


图 6-11 瞬态传热分析模型

长方形的板，几何参数及其边界条件如图 6-11 所示。板的宽度为 5cm，其中间有一个半径为 1cm 的圆孔。板的初始温度为 20℃，将其右侧突然置于温度为 20℃且对流换热系数为 100W/M²℃的流体中，左端置于温度为 500℃的温度场，是计算：

- (1) 第 1s 和第 50s 板内的温度分布情况。
- (2) 整个板在前 50s 内的温度变化过程。
- (3) 圆孔边缘 A 点处温度随时间变化曲线。

3. 建立有限元模型

这里首先建立瞬态传热分析所需的有限元模型。首先准备分析，然后选择单元，定义材料属性，接着创建几何模型最后划分网格。下面详细介绍创建有限元模型的主要步骤及其操作：

1. 添加标题

添加标题，操作如下

GUI: Utility Menu > File > Change Title

标题名: Transient slab Problem

命令: /Title, Transient slab Problem

简化菜单（过虑菜单）操作如下：

GUI: Main Menu > Referenc

在弹出的 Referenc for GUI Filtering 对话框中，选择 Thermal。单击 OK。

命令: /COM, Thermal

2. 选择单元

选择热分析单元，操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete

在弹出的对话框中，单击 Add。在单元类型库对话框中选择 Plane55 单元（如图 6-12 所示）。单击 OK。单击 OK。

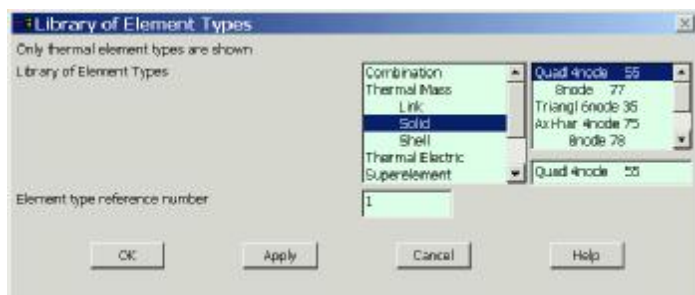


图 6-12 选择单元

命令: ET, 1, PLANE55

3. 定义材料属性

首先进入 Define Material Model Behavior 对话框，操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Material Props

下面定义瞬态热分析所需的材料参数，如热传导率、比热容及材料密度：

（1）定义热传导率

GUI: Main Menu > Preprocessor > Material Props > Thermal > Conductivity > Isotropic

在弹出的定义材料热传导率对话框中的 KXX 栏键入 “5”。

命令: MPDATA, KXX, 1, , 5

（2）定义比热容

GUI: Main Menu > Preprocessor > Material Props > Thermal > Specific Heat

在弹出的定义比热容对话框中的 C 栏键入 “200”。

命令: MPDATA, C, 1, , 200

（3）定义密度

GUI: Main Menu > Preprocessor > Material Props > Thermal > Density

在弹出密度定义对话框中的 DENS 栏键入 “5000”。

命令: MPDATA, DENS, 1, , 5000

材料属性定义完毕，如图 6-13 所示。

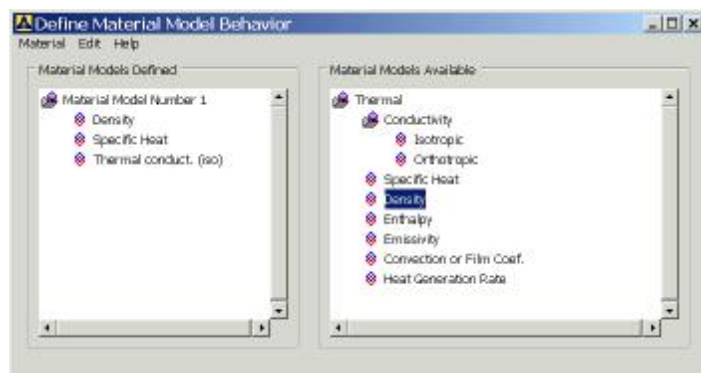


图 6-13 定义热分析材料属性

4. 建立实体模型

根据本例所用模型，首先需要创建矩形，然后是圆，最后在矩形板中央减去（Subtract）圆。下面介绍建立实体模型的操作：

（1）创建矩形

命令：RECTNG, 0, 0.15, 0, 0.05,

（2）创建圆面

其操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Arcs > By Cent & Radius

在弹出对话框中，按照图 6-15 设置，单击 OK 得到圆面。

命令：CYL4, 0.075, 0.025, 0.01

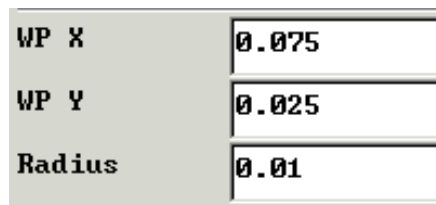


图 6-15 定义圆面

（3）从矩形中减去圆面

根据 ANSYS 建模过程中面序号赋值原理，直接可以肯定圆面序号为 2，矩形序号为 1，因此采用直接键入命令建实体模型：

命令：asba, 1, 2

实体模型如图 6-16 所示。

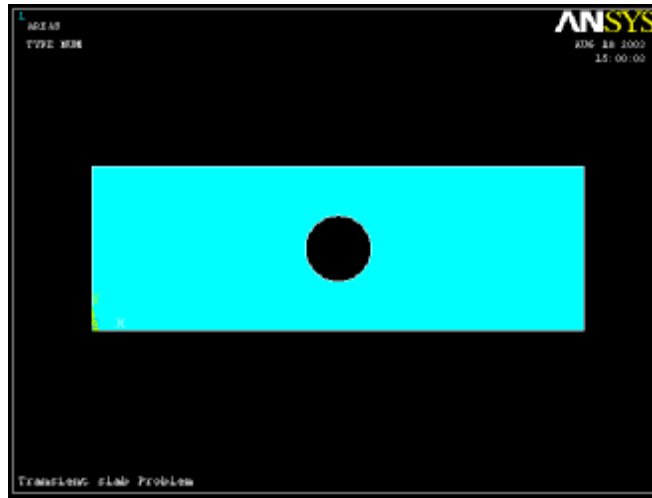


图 6-16 实体模型

(4) 保存数据库

其操作如下：

GUI: Toolbar > SAVE-DB

命令: SAVE

5. 设定网格尺寸并划分网格

下面介绍网格尺寸的设定 (SmartSize 方式):

1. 设定网格尺寸参数并划分网格

通过 SmartSize 控制网格密度, 操作如下:

GUI: Main Menu > Preprocessor > Meshing > MeshTool

选择 SmartSize=3。单击 Mesh。单击拾取对话框中 Pick All 按钮。得到网格图 (如图 6-17 所示)。

命令: SMRT, 3

AMESH, All

2. 保存数据库

其操作如下:

GUI: Toolbar > SAVE-DB

命令: SAVE

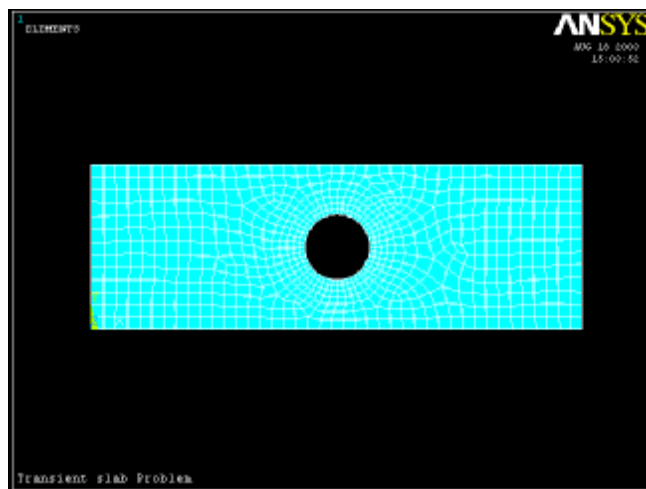


图 6-17 有限元模型

4. 施加载荷并求解

求解之前首先要选择分析类型，然后定义边界条件及其载荷步选项，最后计算。首先选择分析类型。

1. 选择分析类型

选择 Transient 分析，操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > New Analysis

选择 Transient 分析，单击 OK。采用 ANSYS 默认设置，在弹出的子对话框中单击 OK。

命令: ANTYPE, 4

TRNOPT, FULL

LUMPM, 0

2. 定义初始条件

板的初始温度为 20℃，设置初始温度操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define

在弹出的拾取对话框中，单击 Pick All。弹出 Define Initial Conditions 对话框，按照图 6-18 设置。

命令: IC, ALL, TEMP, 20,



图 6-18 定义温度初始条件

3. 定义热约束

瞬态传热分析中的载荷是随着时间发生变化的。对于每一个载荷步都需要指明载荷值及时间值，还需要指定载荷步选项，如加载方式是 **Ramped** 方式还是 **Stepped** 方式。这里需要施加流体载荷和板的传热载荷。首先定义对流载荷。

(1) 定义对流边界

为了便于设定对流边界，首先显示边框图，操作如下：

GUI: Utility Menu > Plot > lines

命令: LPL0T

定义对流载荷/边界首先进入 **Apply Conv on lines** 对话框，操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Convection > On Lines

在弹出对话框中，按照图 6-19 设置，键入 Film coefficient 和 Bulk Temperature 值。

命令: SFL, L2, CONV, 100, , 20,

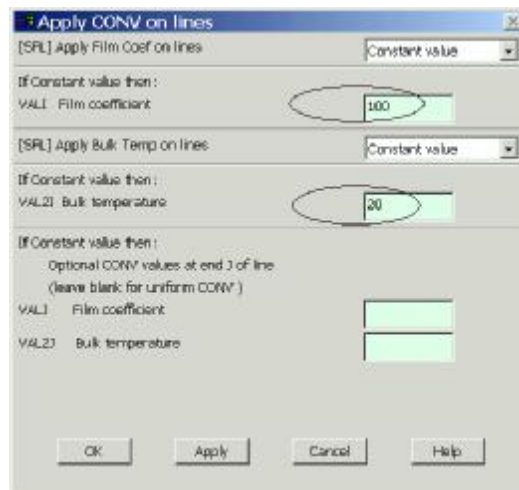


图 6-19 定义对流边界

(2) 定义稳态热边界

在边线上定义稳态热边界，操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Lines

在弹出对话框中，键入边界温度为“500”。单击 OK。

命令: DL, L4, , TEMP, 500, 1

则边界温度条件定义完毕，如图 6-20 所示。剩余两边由于 ANSYS 默认设置为绝热，因此不作设置。

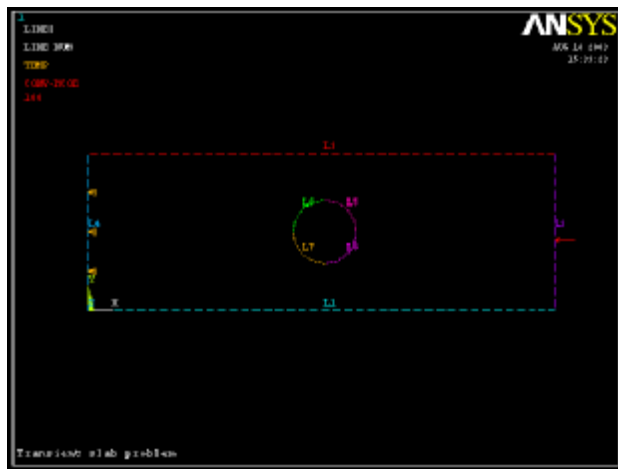


图 6-20 模型热/载荷边界

4. 设置时间及时时间步进参数

设定步进参数使 ANSYS 在较短的时间内达到可以接受的收敛精度。首先进入 Time and time Step Options 对话框，操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time and Substps

在 Time and time Step Options 对话框中按照图 6-21 设置，其余选项不变。

命令: TIME, 50

AUTOTS, 1

DELTIM, 1, 0.1, 2.5, 1

KBC, 1

下面确认时间积分选项打开。操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration

保持默认设置，单击 OK。

命令: TIMINT, 1

TINTP, 0.005, , , -1, 0.5, -1

5. 设置输出控制

输出控制用于决定 ANSYS 要等多长时间向数据库文件写入一次结果。这里去时间间隔为 1s。输出控制选项设置，操作如下：

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > DB/Results File

在 File Write Frequency 栏选项 Every Substep。

命令: OUTRES, ALL, ALL,

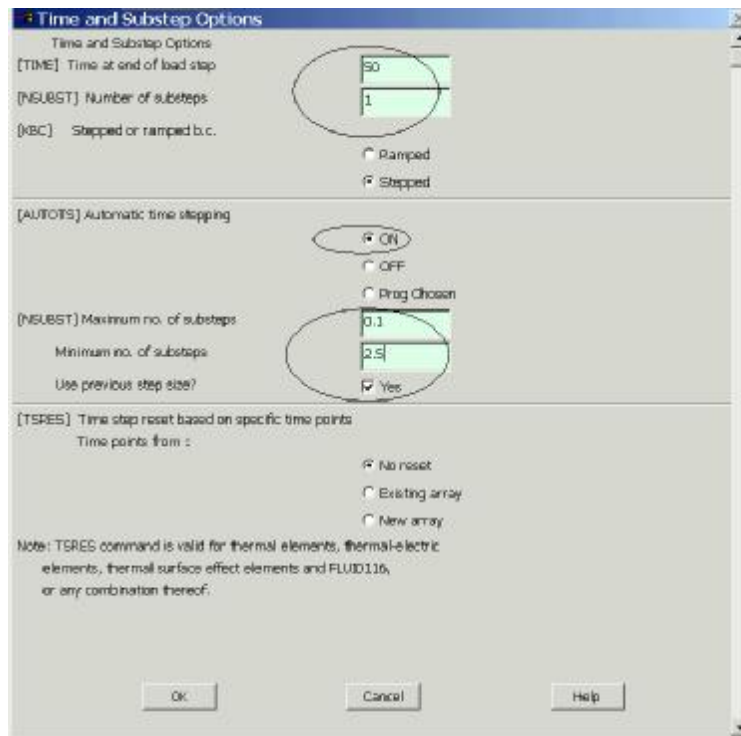


图 6-21 设置时间及时间步参数

6. 求解

GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS.

命令: Solve

五、查看分析结果

根据题目要求,首先在 POST1 后处理中查看第 1s 和 50s 时温度分布,然后动画显示温度场变化情况,最后是通过 POST26 查看 A 点处温度随时间变化曲线。下面解释查看分析结果的详细操作:

1. POST1 后处理

1. 显示第 1s 和和第 50s 时温度场

首先读入分析结果文件,然后分别显示第 1s 和第 50s 时模型温度场。首先读入第 1s 时结果文件,操作如下:

GUI: Main Menu > General Postproc > By Time/Freq

在弹出的 Read Results by time or Frequency 对话框中进行如图 6-22 设置。单击 OK。显示第 1s 时温度场,操作如下:

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu

取 ANSYS 默认设置,单击 OK。图 6-23 所示为第 1s 时温度场。

命令: PLNSOL, TEMP, , 0,

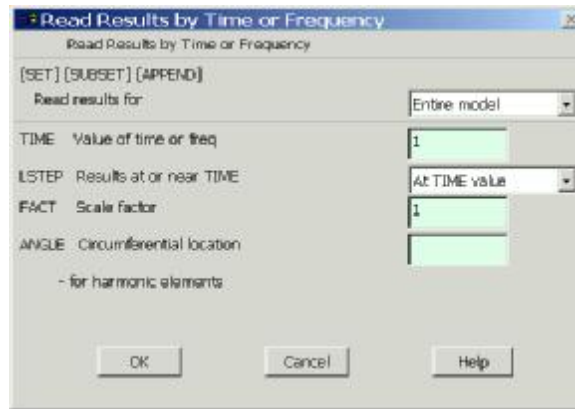


图 6-22 读入分析结果

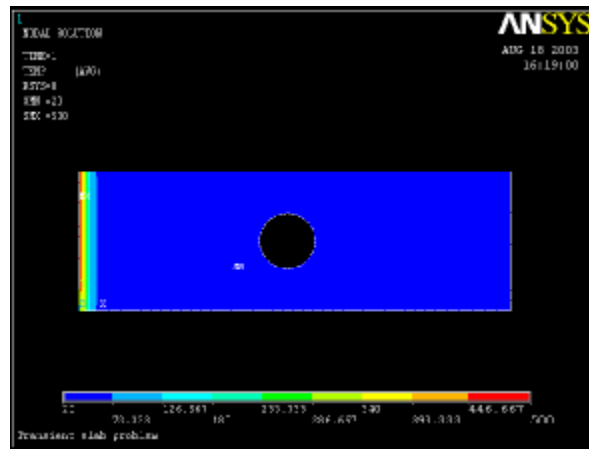


图 6-23 第 1s 时温度场

重复上述操作，读入第 50s 时结果并显示温度场。图 6-24 所示为第 50s 温度场。

2. 显示温度场变化动画

显示 1~50 秒内温度变化情况，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Animate Over Time

设置显示 1~50s 内温度变化动画。

命令: ANTIME, 20, 0.5, , 1, 2, 1, 50

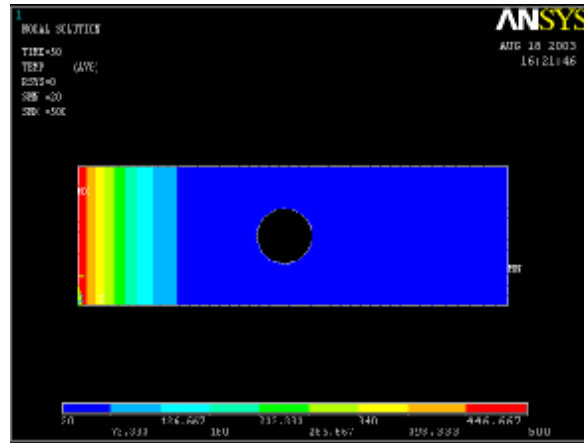


图 6-24 第 50s 时模型温度场

2. POST26 后处理

需要查看 A 点随时间变化的温度场，首先必须定义 A 点温度变量，然后才能显示 A 点处温度随时间变化曲线。下面介绍查看 A 点分析结果的详细操作：

1. 定义 A 点温度变量

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框，选择温度作为变量（如图 6-25 所示）。根据提示选择 A 点。

命令: NSOL, 2, 7, TEMP, , A

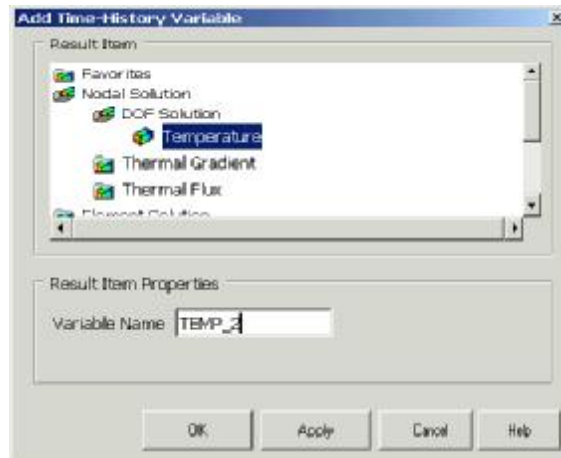


图 6-25 定义温度变量

2. 显示 A 点温度-时间变化曲线

显示 A 点温度随时间变化曲线，单击 Plot 按钮，得到 A 点温度随时间变化曲线（如图 6-26 所示）。

命令: PLVAR, 2,

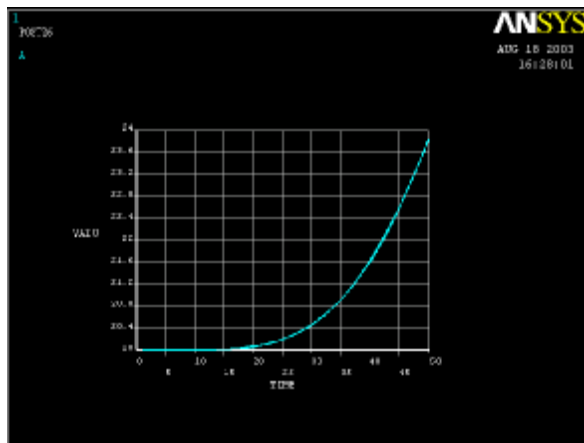


图 6-26 A 点温度-时间变化曲线

6. 命令流求解

将上面分析过程中的命令边界成为命令流文件，通过 GUI: File > Read Input from...，导入即可。这里不再列出。

7. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作；掌握定义热传导率和比热容的操作，可以根据已知条件定义材料的热传导率和比热容。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握定义初始温度场的操作，可以定义均匀温度场初始条件，了解非均匀温度场初始条件的定义方法；掌握瞬态温度分析选项的设定，并理解各选项对分析的影响，可以根据模型的复杂程度和载荷的特性设置合理的参数。

3. 关于查看分行结果的总结

掌握根据时刻查看温度场的操作，了解 ANSYS 热分析结果提取的注意事项，尽量避免出现结果线性插值方式提取结果；掌握查看特定节点温度随时间变化曲线的操作，可以提取任意感兴趣的节点温度-时间变化曲线，了解热传导对结构局部温度的影响。

6.4 热辐射分析

6.4.1 热辐射分析简介

辐射是一种通过电磁波传递能量的方式。电磁波以光速传播且无需任何介质。热辐射仅为电磁波谱中的一小段。因为由于热辐射引起的热流与物体表面绝对温度的四次方成正比，因此热辐射分析是高度非线性的。

6.4.2 热辐射问题分析

ANSYS 提供了三种方法分析热辐射问题：

- (1) 用 LINK31, 辐射线单元, 分析两个点或多对点之间的热辐射
- (2) 用表面效应单元 SURF19 或 SURF22, 分析点对面的热辐射
- (3) 用 AUX12, 热辐射矩阵生成器, 分析面与面之间的热辐射

以上三种方法既可用于稳态热分析, 也可用于瞬态传热分析。

注意:

热辐射分析要注意温度的单位制, 因为计算热辐射使用的温度单位是绝对温度。如果在加载时使用的是华氏温度, 就要设置 460 的差值; 如果为摄氏温度, 差值为 273。

1. 使用 LINK31 单元的注意事项

LINK31 是一个两节点非线性线单元, 用于计算由辐射引起的两点之间的热传递。此单元要求键入如下的实常数:

- Ø 有效的热辐射面积
- Ø 形状系数
- Ø 辐射率
- Ø Stefan-Boltzmann 常数

2. 使用表面效应单元的注意事项

表面效应单元可以方便地分析点与面之间的辐射传热。SURF19 用于二维模型, SURF22 用于三维模型。单元应设置为包含辐射 KEYOPT (9)。

3. 使用 AUX12—辐射矩阵生成器

此方法用于计算多个辐射面之间的辐射传热。这种方法生成辐射面之间形状系数矩阵, 并将此矩阵作为超单元用于热分析。

AUX12 方法由三个步骤组成, 即首先定义辐射面, 然后生成辐射矩阵, 最后在热分析中使用辐射矩阵。下面介绍使用 AUX12 求解热辐射问题的步骤:

1. 定义辐射面

- (1) 首先建立有限元模型
- (2) 在辐射面上覆盖一层 SHELL57 (3D) 或者 LINK32 (2D) 单元

辐射面往往是 3D 模型中的面或 2D 模型中的边 (如图 6-27 所示), 因此在辐射表面用 SHELL57 (3D) 或 LINK32 (2D) 划分网格。最好的方法是先选择辐射表面的节点, 然后用如下方法创建 SHELL57 或 LINK32 单元:

命令: ESURF

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Surf/Contact > Surf Effect > General Surface

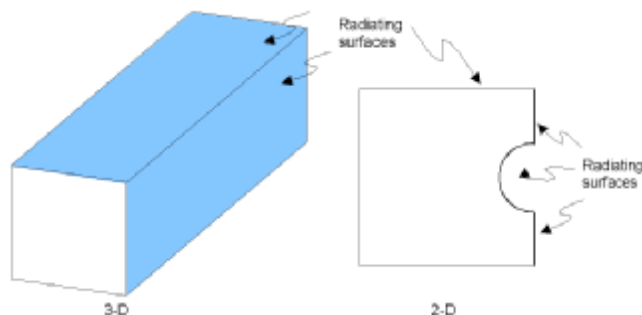


图 6-27 模型的辐射面

注意:

(1) 辐射面上的 SHELL57 或 LINK32 单元与节点必须与实体单元相吻合, 否则计算的结果是不正确的。

(2) 生成的 SHELL57 或 LINK32 单元的取向也很重要。AUX12 假定辐射的方向是 SHELL57 的 +Z 向或 LINK32 的 +Y 向。因此在生成 SHELL57 或 LINK32 单元时要注意节点的排列顺序。

如果所分析的系统是开放的, 即一个面所辐射的热能未被模型中其它的面吸收, 则必须定义一个空间节点, 用于吸收损失的辐射热量。这个节点的位置是任意的。对于封闭的系统, 不应定义空间节点。

2. 生成辐射矩阵

生成辐射矩阵首先需要进入 AUX12, 然后选择所需节点和单元, 确定模型的维数

(1) 进入 AUX12

命令: /AUX12

GUI: Main Menu > Radiation Matrix

(2) 选择组成辐射面的节点和单元

比较方便的方法是根据单元类型选择单元, 并选择单元上的节点。

(3) 确定模型是 3D 还是 2D

命令: GEOM

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Other Setting

AUX12 用不同的算法计算 2D 或 3D 模型的形状系数。AUX12 默认为 3D。2D 分为纯平面或轴对称, 默认为纯平面。

(4) 定义每个辐射面的辐射率

命令: EMIS

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Emissivities

辐射面的辐射率 ANSYS 默认为 1。

(5) 定义 Stefan-Boltzmann 常数

命令: STEF

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Other Settings

Stefan-Boltzmann 常数，ANSYS 默认为英制单位 $0.199\text{E-}10\text{Btu/hr-in}^2\text{-R}^4$ 。

(6) 确定状系数

命令: VTYPE

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Write Matrix

用什么方式计算形状系数，ANSYS 提供两种选择，即选择是隐藏还是非隐藏方法。

非隐藏方法计算每两个单元之间的形状系数，无论它们之间有无障碍；隐藏方法（默认）用一种隐藏线算法判断两辐射面之间是否“可见”，如果可见则计算形状系数。

(7) 定义空间节点：

命令: SPACE

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Other Settings

如为开放系统，

(8) 计算辐射矩阵并写入 jobname.sub 文件

命令: WRITE

GUI: Main Menu > Radiation Matrix > Write Matrix

如果要打印此矩阵，在执行上述命令之前键入“MPRINT, 1”。

(9) 选择所有的节点和单元

3. 在热分析中使用辐射矩阵

下面介绍如何在热分析中定义辐射矩阵：

(1) 重新进入 PREP7，定义一个新的单元类型 MATRIX50（超单元）

(2) 将单元类型指向超单元

命令: TYPE

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > Elem Attributes

(3) 读入超单元矩阵

命令: SE

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Elements > From .SUB File

(4) 不选择或删除用于生成辐射矩阵的 SHELL57 或 LINK32 单元

命令: EDELE

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Delete > Elements

(5) 进入/SOLUTION 施加其它热载荷并求解

(6) 其他步骤与普通热分析相同

6.4.3 使用空间节点的建议

使用或者不使用空间节点可能会明显影响计算精度。下面根据空间节点的定义方式介绍使用空间节点需要注意的事项。

1. 对于非隐藏法

用非隐藏法计算形状系数，对于不用考虑空间节点的系统精度可能满足要求。通常对于

封闭系统不应该定义空间节点；而对于开放系统应当定义。尤其对于开放系统中含有黑体（辐射率 1），必须定义一个空间节点，保证计算精度。

2. 对于隐藏法

形状系数计算的精度会影响到空间节点的计算辐射计算，由于计算的误差在空间节点上累积，在封闭或者近似封闭系统中空间节点上开始系数的相对误差会过大。

使用隐藏法时，可能会需要增大计算形状系数时的射线数量，并细化网格，以便于得到更精确的形状系数。如果上述方法不能满足要求，可以考虑下面建议：

- Ø 对于封闭系统，即所有的辐射面行程一个封闭空间，不向外界辐射，不要使用空间节点。
- Ø 如果问题的实质允许，只模拟辐射面间辐射（可以忽略向空间的辐射），不要定义空间节点。这种情况仅对黑体（辐射率 1）有效。
- Ø 对于一个接近封闭的系统，如果必须考虑向空间的辐射，可以在开口处划分网格，并约束开口处的温度自由度，使空间形状系数计算精度更高。
- Ø 对于有明显空间损失的开放系统，可以使用空间节点（需要定义节点的热边界条件），来计算辐射损失，合理的网格密度及射线数量会得到足够精度的结果。

6.4.4 使用 AUX12 的几点注意事项

下面介绍使用 AUX12 建模时需要非常注意的事项，这些也是建模过程中最容易出现错误的地方：

Ø 注意非隐藏法的应用条件

只有所有的辐射面之间可以完全看到对方时，才能使用非隐藏法。否则，形状系数的计算是错误的，热分析的结果可能不可靠甚至不收敛。

对于有些情况可以对辐射面分组，各组之间完全独立，每组中的辐射面是完全可见的，可以采用非隐藏法计算形状系数，分别写入辐射矩阵文件，以便介绍计算时间。

Ø 尽量避免使用隐藏法

隐藏法需要更多的计算时间，所以只有辐射面间有障碍存在或者无法分组计算时才选择使用。

Ø 定义合理的网格密度

通常辐射表面的网格越密、越规则，形状系数计算精度越高。

对于轴对称情况，NDIV 设为 20，可以得到足够精确的形状系数。单元扩展到三维空间时应该有合理的形状。

Ø 通过定义合理的射线数量来控制形状系数的计算精度

对于隐藏法，增大射线数量可以提供形状系数的计算精度。

Ø 根据模型类型处理单元

用于生成二维辐射矩阵的 LINK32 单元，但是不直接支持轴对称选项，因此，为保证计算结果可靠性，计算之前需要删除（或者 Unselect）此单元。

Ø 判断辐射面设定是否合理

理论上，对于封闭系统，有任意一个辐射面到另外所有其他辐射面的形状系数的和为 1，

而对于开放系统则是小于 1。可以在后处理时查验形状系数的和是否超出 1 来判断计算是否可靠。一般两个辐射面之间有障碍时，采用非隐藏法计算时会出现形状系数之和大于 1 的情况。

6.5 热-应力耦合分析

6.5.1 耦合分析简介

耦合场分析考虑两个或者两个以上的物理场之间的相互作用。这种分析包括直接和间接耦合分析。

当进行直接耦合时，多个物理场（如热-点）的自由度同时进行计算，这就是直接法，器适用于多个物理场各自的响应相互倚赖的情况。由于平衡状态要满足多个准则才能取得，直接耦合分析往往是非线性的。每个节点上的自由度越多，矩阵方程就越庞大，消耗的计算时间也越多。

Coupled-Field Elements

Element Name	Description
SOLID5	Coupled-field brick
PLANE13	Coupled-field quadrilateral
FLUID29	Acoustic quadrilateral
FLUID30	Acoustic brick
CONTAC48	2-D point to surface contact
CONTAC49	3-D point to surface contact
SOLID62	3-D magneto-structural
FLUID66	Thermal-flow pipe
PLANE67	Thermal-electric quadrilateral
LINK68	Thermal-electric line
SOLID69	Thermal-electric brick
SOLID98	Coupled-field tetrahedron
CIRCU124	General circuit
SHELL157	Thermal-electric shell

图 6-28 耦合分析单元类型

间接耦合分析是以特定的顺序求解单个物理场的模型。前一个分析的结果作为后续分析的边界条件施加，有时候也被成为序贯耦合分析。

间接耦合法主要用于物理场之间单向的耦合关系。如，一个场的响应（如热）将显著影响到另外一个物理场（如结构）的响应，反之不成立。此法一般来说比直接耦合效率高，而且不需要特殊的单元类型。这里只讨论设计热的耦合现象。而且需要注意不是所有 ANSYS 产品都支持所有耦合单元类型和分析选项。ANSYS 耦合单元类型如图 6-28 所示。

6.5.2 耦合问题分析方法简介

这里介绍直接法和间接法用于热耦合分析应该注意的事项。

1. 直接法

任何方法的分析的过程大致相同，这里只是介绍处理热耦合分析中需要注意的事项，注意事项分为前处理注意事项及求解、后处理注意事项。

1. 前处理过程中应该注意的事项

Ø 合理选择单元类型

使用耦合场单元的自由度序列应该符合需要的耦合场要求。模型中不需要耦合的部分应使用普通单元。

Ø 理解单元及单元选项

仔细研究每种单元类型的单元选项，材料特性和实常数。耦合场单元相对来说有更多的限制（如，PLANE13 不允许热质量交换而 PLANE55 单元可以，SOLID5 不允许塑性和蠕变而 SOLID45 可以）。

Ø 不同场分析使用统一的单位制

Ø 由于需要迭代计算，热耦合场不能使用子结构

2. 直接法加载，求解和后处理过程中需要注意的事项

（1）带有温度自由度的耦合场单元选项进行瞬态分析类型注意事项

Ø 瞬态温度效果可以在所有耦合场单元中使用。

Ø 瞬态电效果（电容，电感）不能包括在热-电分析中（除非只是 TEMP 和 VOLT 自由度被激活）。

Ø 带有磁向量势自由度的耦合单元可以用来对瞬态磁场问题建模（如 SOLID62 单元）。带有标量势自由度的单元只能模拟稳态现象（SOLID5）。

（2）理解单元的自由度及许用载荷

耦合场单元允许的相同位置（节点，单元面等）施加多种类型的载荷（D, F, SF, BF）

（3）合理设置分析选项改善收敛性

耦合场分析可以是高度非线性的。考虑使用 Predictor 和 Line Search 功能改善收敛性。

（4）使用 Muti-Plots 功能多结果同时输出

2. 间接法

在 ANSYS 中由两个基本方法进行序贯耦合场分析。他们主要区别在与每个场的物理特性是如何表示的：

（1）物理环境法：使用单独的数据库文件在所用场中使用，用多个物理环境文件来表示每个场的特性。

（2）手工法：建立多个数据库进行存储，每次研究一种场。每个场的数据都存储在数据库中。

这里主要介绍物理环境法。

为了进行序贯耦合场分析，ANSYS 允许用户在一个模型中定义多个物理环境。一个物理环境代表模型在一个场中的行为特性。

物理环境文件是 ASCII 码文件，包含以下内容：单元类型和选项，节点和单元坐标系，耦合和约束方程，分析和载荷步选项，载荷和边界条件，GUI 界面和标题。

下面介绍物理环境法时需要注意的事项：

Ø 选择同时满足所有物理场的单元

建立带有物理环境的模型时，需要选择与所有物理场相容的单元类型。例如，8 节点的热块单元和 8 节点的结构块单元相容，但不与 10 节点结构单元相容（如图 6-29 所示）。

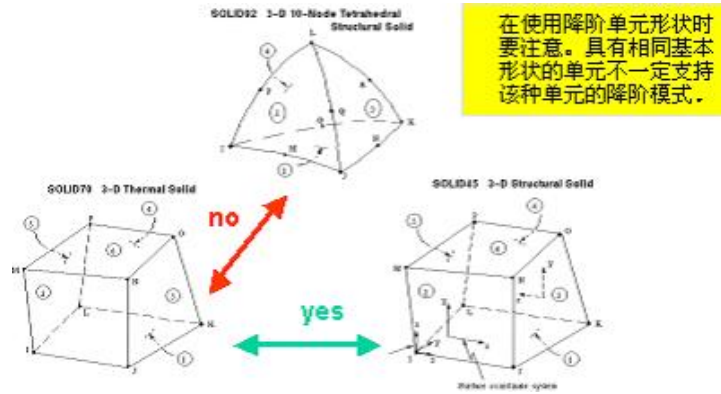


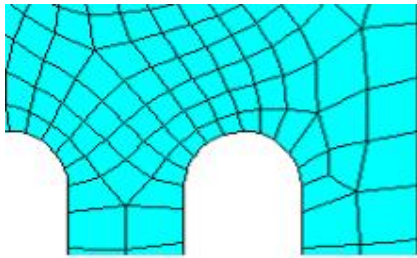
图 6-29 单元必须相容

除了相似的单元阶数（形函数阶数）和形状，绝大多数单元需要相似的单元选项（如平面二维单元的轴对称）以满足相容性。但是需要载荷类型不需要环之间完全相容。例如，8 节点热体单元可以用来给 20 节点结构块单元提供温度。许多单元需要特殊选项设置来与不同阶数的单元相容。

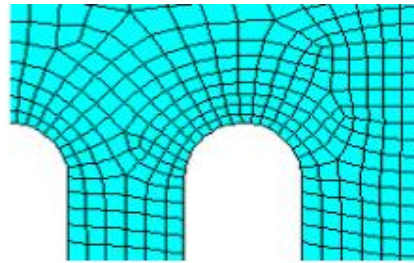
Ø 保证单元属性号码（MAT，REAL，TYPE）在环境之间号码的连续性

Ø 选择合理的网格密度

对于在某种特殊物理环境中不参与分析的区域使用空单元类型（type #zero）来划分（如，在电磁场分析中需要对物体划分周围单元空气建模而热和结构分析中不需要）。同时，确认网格划分的密度在所有物理环境中都能得到可以接受的结果（如图 6-30 所示）。



这种划分方法在热分析中可以得到满意的温度分布，但...



这样的网格密度在结构分析中才能得到准确的结果。

图 6-30 选择合理的网格密度

Ø 考虑边界条件的相容性

物理环境法允许在一个模型中定义最多 9 种物理环境。这种方法应该考虑多于两个场相互作用时或不能在每个环境中使用不同的数据库文件的情况下边界使用。下面介绍最常用的、也是比较简单的热-结构耦合分析，即热—应力耦合分析。

6.5.3 热-应力耦合分析的主要步骤

当结构加热或者冷却时，会发生膨胀或者收缩。如果结构各个部分之间膨胀收缩程度不同，或者结构膨胀、收缩收到限制时，就会产生热应力。对于这种热与结构的耦合分析，主要介绍间接法。

下面介绍间接法分析热应力问题时的步骤：

1. 首先进行热分析

可以使用热分析的所有功能，包括传导、对流、辐射、表面效应单元等，进行稳态或者瞬态传热分析。但是需要注意网格密度的合理性。

2. 重新进入前处理，转换单元类型

转换单元类型必须考虑单元间的相容性，操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Element Type > Switch Element Type

选择 Thermal to Structural

命令: ETCHG,TTS

单元转换过程中需要注意相应的单元选项（主要是不同类型分析切换时在新的环境中定义前面环境没有定义的单元属性），必要时通过手动设置。

3. 设置材料属性以及前处理细节

需要定义的材料属性包括热膨胀系数等参数；前处理细节包括节点耦合、约束方程等。

4. 读入热分析温度

GUI: Main Menu > Load Apply > Temperature > From Thermal Analysis

键入或者选择热分析的结果文件。如果热分析是瞬态的，则还需要键入热梯度最大时时间点或者载荷步。节点温度作为体载荷施加，可以通过 GUI: Utility Menu > List > Load > body Load > On all nodes 列表输出。

5. 设置参考温度

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Settings > Reference Temp

6. 求解并查看分析结果

6.5.4 热-应力耦合分析实例

1. 教学目的

通过实例讲解耦合场分析的详细步骤，使读者真实体验耦合分析的特性，具备分析简单耦合问题的能力

2. 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 耦合分析。

分析类型：静态耦合热-应力分析。

单元类型：LINK33

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作；定义热分析环境参数；定义结构分析参数；进行耦合分析操作；基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件：在 Coupled-Field Analysis Guide 获取相关知识，在 ANSYS Elements Reference 部分了解 LINK33 单元的详细信息

一个钢制杆件，开始时内部应力为零，两端被固定在实体结构上，实体温度为 0°C 。现在，两个实体中的一个开始升温，温度达到 75°C 。由于两个实体之间温度差必然出现热传导，随着实体之间的热传导，杆的温度出现变化，由温度变化引起杆的体积膨胀。由于杆两端固定在实体上，不能自由伸缩，因此杆内部应力出现变化。求解最终杆应力值。

对问题进行合理简化。杆件只是温度变化，杆两端温度差为 75°C ，不受外力载荷。材料的弹性模量为 200GPa ，热传导率为 $60.5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，热膨胀系数为 $12\text{e-}6\text{ /K}$ 。模型如图 6-31 所示。

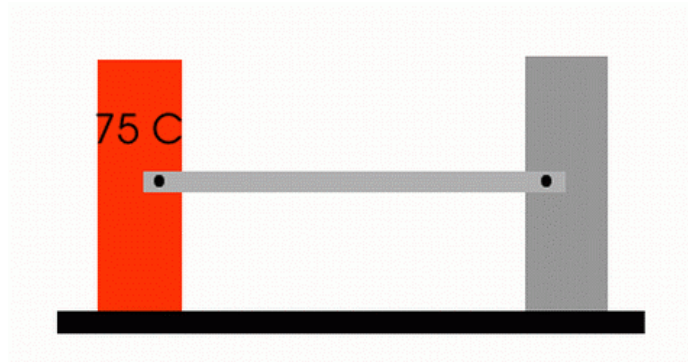


图 6-31 热-应力耦合分析模型

3. 热分析环境

在热模型环境中创建实体，并在热模型分析环境中施加温度。前处理部分需要创建所有必需的环境，这也是进行耦合分析的所必须的，这些信息将导入内存中。在求解部分这些数据将用来求解此耦合问题。这里按照实际分析操作介绍。

1. 添加标题

其操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Title

新标题: Thermal Stress Example

命令: /title,Thermal Stress Example

2. 进入前处理器

命令: /PREP7

3. 定义关键点

其操作如下:

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

根据提示键入关键点坐标及序号, 创建坐标为 (0, 0) 和 (1, 0) 的两个关键点。

命令: K, 1, 0, 0, 0

K, 2, 1, 0, 0

4. 定义直线

以关键点定义直线, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord

根据提示连接 1 #、2 # 关键点。

命令: L, 1, 2

线长度为 1 米。

5. 选择热分析单元

选择所需热分析单元, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

在单元库中选择 LINK33 单元 (三维热传导分析单元)。这种单元为单轴单元, 通过节点进行热传导。

6. 定义热分析单元实常数

GUI: Preprocessor > Real Constants... > Add...

在 Real Constants for LINK33 对话框中键入下面几何参数:

横截面积 (Cross-sectional area AREA): 4e-4

即梁的横截面尺寸为 2cm×2cm。

7. 定义材料属性

定义热传导率, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Thermal > Conductivity > Isotropic

在弹出对话框中键入钢的热传导系数: 热传导系数 (KXX) =60.5。

8. 设定网格尺寸

确定线模型的网格边长, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines...

键入网格边长为 0.1 米。

9. 划分网格

GUI: Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All

10. 定义热分析物理环境

热分析环境 (几何实体及热参数) 现在已经定义完了, 随后就要写入数据库中, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Physics > Environment > Write

弹出 Physics Write 对话框 (如图 6-32 所示), 在物理文件名 (Title physice file title) 栏键

入 Thermal。单击 OK 按钮。

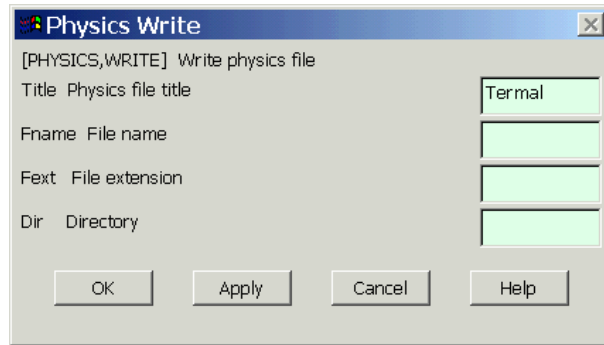


图 6-32 写入热环境数据

11. 清除当前环境数据

清除所有几何模型数据，为结构分析做准备，操作如下：

GUI: Preprocessor > Physics > Environment > Clear > OK

这样就清除了所有的几何参数，如单元类型，材料参数等等。然而，并没有清除几何实体，所以还可以在下面结构分析的过程中继续使用。

4. 结构分析环境

因为在前面的分析过程中几何实体已经定义完毕，其数据将在下面的结构参数中详细定义：

1. 转换单元类型

现在进行结构分析，将热分析单元转换到结构单元类型，操作如下：

GUI: Preprocessor > Element Type > Switch Elem Type

依照图 6-33 进行转换选择。

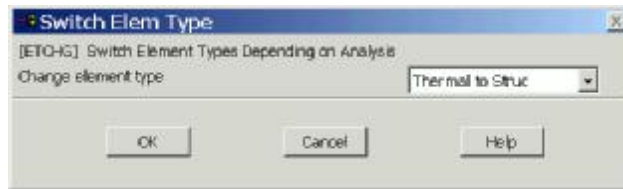


图 6-33 转换单元类型

这样单元自动转换为相应的结构分析类型，转换后的单元为 LINK8 单元。有关 LINK8 单元的详细信息参考 ANSYS Help 文件。这时回弹出一个警示对话框提醒用户调整单元类型以满足分析的要求，这里用户可以根据自己所分析的问题类型进行相应的调整。在本例分析中只有材料参数需要调整，几何形状不用改变。

2. 定义材料属性

定义材料属性（弹性模量、泊松比及热膨胀系数），操作如下：

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出对话框中键入钢的力学参数：

杨氏模量（即弹性模量，Youngs Modulus EX）：200e9

泊松比（Poissons Ratio PRXY）：0.3

定义热膨胀系数，操作如下：

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Thermal Expansion Coef

> Isotropic

在弹出的对话框中键入热膨胀系数：热膨胀系数（ALPX）等于 12e-6。

3. 定义结构分析物理环境

结构分析环境参数定义完毕，导入数据库文件中，操作如下：

GUI: Preprocessor > Physics > Environment > Write

弹出对话框中，在物理文件名（Title physice file title）栏键入 Struct 然后单击 OK 按钮。

5. 施加载荷并求解

热应力求解过程与其他类型分析差别不是很大。下面介绍热-应力耦合分析的加载并求解过程的主要步骤。

1. 选择分析类型

选择稳态分析，操作如下：

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Static

命令: ANTYPE, 0

2. 导入热分析环境数据

现在要进行耦合分析前的数据导入工作，首先导入热分析环境数据，操作如下：

GUI: Solution > Physics > Environment > Read

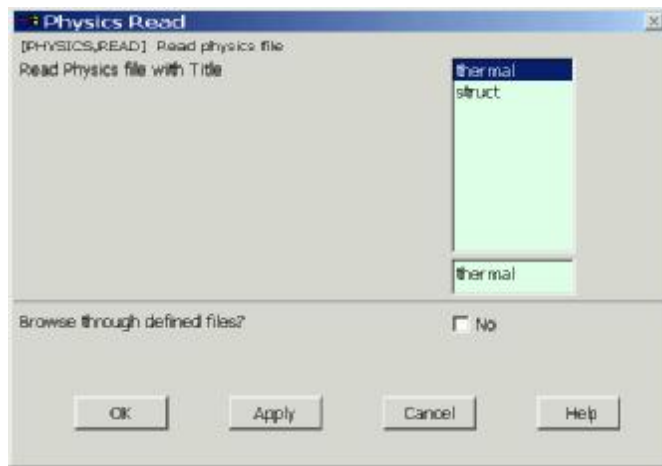


图 6-34 导入热分析环境数据

在 Physics Read 对话框（如图 6-34 所示）中选择 thermal 并单击 OK 按钮完成操作。

注意：

如果在求解菜单下物理选项不可用，单击求解菜单底部的 Unabridged Menu，然后再试试。

3. 定义温度约束

通过关键点定义结构分析边界条件，即杆的端点温度，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Thermal > Temperature > On Keypoints

在杆的最左侧关键点（1# 关键点）上定义温度为 348K。

4. 求解热分析

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

5. 关闭求解器

通过主菜单关闭求解器，操作如下：

GUI: Main Menu > Finish

注意：

关闭当前分析环境对于随后新的分析很有必要，这样可以避免前面残余数据可能造成的影响。如果操作过程中没有这么做，可能回弹出错误信息。

现在，热分析求解完成了。如果显示杆件上的静态温度场，会看到杆上温度均为 348K，与期望结果吻合。分析结果已经保存，文件名为 Jobname.rth，在这里 rth 后缀表示文件为热分析结果文件。因为，从分析开始没有改变文件名，所以，用户可以通过 file.rth 查找。下面将用这些数据来进行结构分析，获取杆件应力。

6. 导入结构分析环境数据

完成热分析后，利用其数据进行结构分析，操作如下：

GUI: Solution > Physics > Environment > Read

在弹出对话框中选择 struct 并单击 OK 按钮。

7. 定义位移约束

在关键点上定义边界条件，即限制杆两端的位移，操作如下：

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

固定 (Fix) 1# 关键点，限制其所有自由度。限制 2# 关键点 UY 平移。

8. 引入温度效应

导入前面温度分析数据进行耦合分析，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature > From Therm Analy

在 Apply TEMP from thermal Analysis 对话框（如图 6-35 所示）中键入文件名 File.rth。这样就耦合了前面热分析数据并将在下面的结构分析中应用。

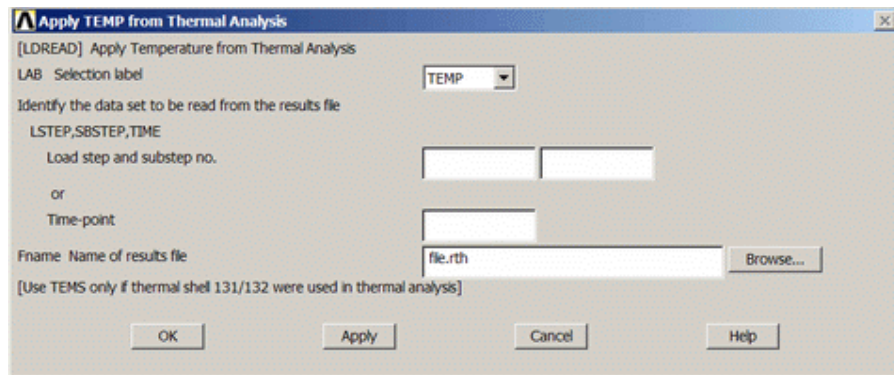


图 6-35 导入热分析数据

9. 定义参考温度

考虑初始温度（参考温度），定义参考温度，操作如下：

GUI: Preprocessor > Loads > Define Loads > Settings > Reference Temp

定义初始温度为 273K，如图 6-36 所示。

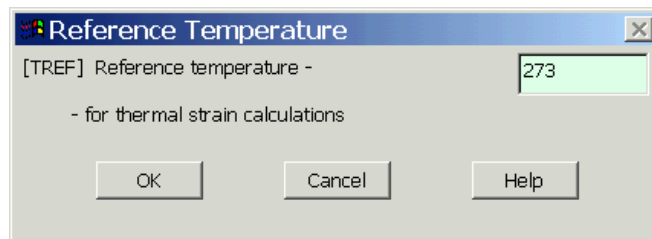


图 6-36 引入参考温度

10. 求解热-应力耦合方程

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

6. 察看结果

为了保证分析结果真实、可靠，首先计算参考数据：

1. 计算参考数据

为了检验 ANSYS 分析数据是否可信，这里先通过手工计算出结果。

自由状态时由于热应力造成的杆件伸长量为：

$$\delta = \alpha \Delta T L$$

由于外力（沿杆轴向施加）造成的杆件伸长量为：

$$\delta = PL/EA$$

则由于热膨胀引起的应力为：

$$P = \alpha \Delta T EA$$

或

$$\sigma = F/A = \alpha \Delta TE$$

因此由于热膨胀引起的杆应力为：

$$\sigma = (0.000012/\text{K}) (348\text{K}-273\text{K}) (200\text{e}3\text{MPa}) = 180\text{MPa}$$

杆的内力大小为 180MPa，为压应力。

2. 查看 ANSYS 分析结果

主要是通过单元数据列表查看轴向应力，下面介绍查看轴向应力列表的操作步骤：

(1) 定义单元数据列表

对于线单元需要通过单元数据列表提取数据，然后才能显示结果等值线图。

创建单元列表，操作如下：

GUI: General Postproc > Element Table > Define Table > Add

在弹出的 Define Additional Element Table Items 对话框（如图 6-37 所示）中按照单元序号显示。

命令: ETABLE, CompStress, LS, 1

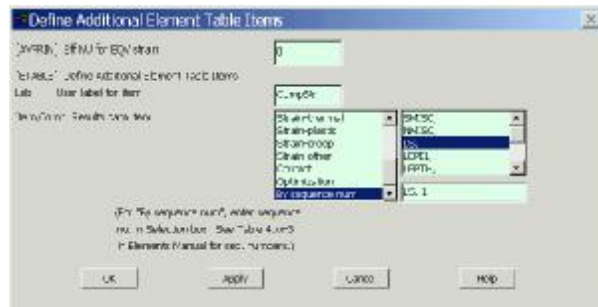


图 6-37 创建单元列表

(2) 显示应力数据列表

在定义显示列表后提取单元应力数据，操作如下（如图 6-38 所示）：

GUI: General Postproc > Element Table > List Elem Table > COMPSTR > OK

命令: PRETAB, CompStress



图 6-38 显示单元应力数据列表

单元应力数值列表如图 6-39 所示。注意到每个单元的应力值均为-0.180e9 Pa，即 180 MPa，与手算数值相吻合。



图 6-39 单元应力数据

7. 命令流求解

ANSYS 命令流 (ANSYS Command Listing):

Finish !下面两行命令将清除原有状态并清除数据

/clear

/title, Thermal Stress Example

/prep7 !进入前处理

k, 1, 0, 0 !定义关键点

k, 2, 1, 0

l, 1, 2 !由关键点定义线

et, 1, link33 !选择单元类型

r, 1, 4e-4, !定义实常数: 面积

mp, kxx, 1, 60.5 !热传导系数

esize, 0.1 !定义单元尺寸

lmesh, all !划分单元

physics, write, thermal !热物理环境写入

physics, clear !清除当前环境参数

etchg, tts !单元类型

mp, ex, 1, 200e9 !定义材料参数: 弹性命令

mp, prxy, 1, 0.3 !定义材料参数: Poissons ratio

mp, alpx, 1, 12e-6 !定义材料参数: 热膨胀系数

physics, write, struct !写入结构分析环境

physics, clear !清除当前环境

finish !退出前处理

/solu !进入求解部分

antype, 0 !稳态分析

physics, read, thermal !导入热环境数据

dk, 1, temp, 348 !在1# 关键点定义温度, 75

```

solve                !求解
finish               !退出求解
/solu                !重新进入求解状态
physics, read, struct !导入结构分析环境数据
ldread, temp, , , , , rth !定义热载荷
tref, 273
dk, 1, all, 0        !定义结构约束条件
dk, 2, UX, 0
solve                !求解
finish               !退出求解
/post1               !进入后处理
etable, CompStress, LS, 1 !建立 LINK单元应力列表
PRETAB, CompStress   !显示单元应力列表

```

八、实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握定义热膨胀系数的操作，可以定义热-应力耦合分析问题的材料热膨胀系数；掌握耦合场单元转换操作，并可以根据分析类型自主调整单元参数，本例中需要调整的主要是结构分析单元的材料属性（热分析过程中没有定义）。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握简单的热-应力耦合分析验证方法，对简单的模型可以通过常识或者自己计算大致的结果判断 ANSYS 分析结果是否可以接受；可以利用直接法进行简单的热-应力耦合分析。

6.6 本章小结

通过本章学习需要掌握以下内容：

（1）掌握热分析的基础知识，了解热分析的特点及其 ANSYS 热分析的主要类型，特别注意掌握热载荷/边界的定义。

（2）掌握稳态传热的基础知识，了解常用的热分析单元及稳态传热分析的主要步骤，特别需要掌握的是稳态热分析过程的热载荷定义，并通过实例操作掌握分析稳态传热问题的能力。

（3）掌握瞬态传热的基础知识，了解稳态传热分析的主要步骤，特别掌握瞬态传热求解及求解选项设定，并通过实例操作掌握分析瞬态热的能力。了解简单的相变问题的基础知识。

（4）了解辐射传热的基础知识及辐射传热分析的主要步骤，特别需要掌握辐射传热分析与传统热分析的差异，掌握辐射分析建模能力。

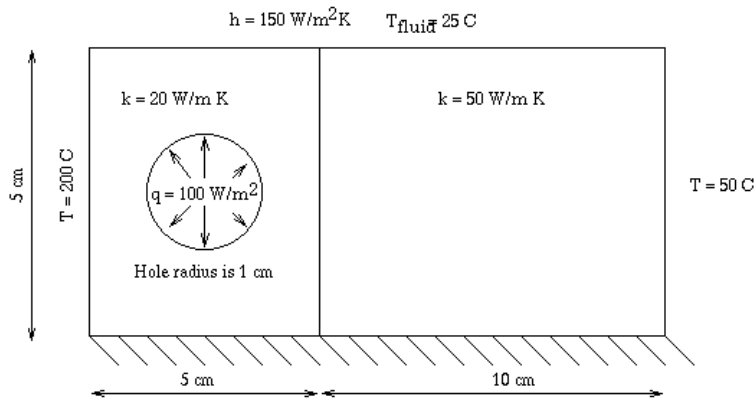
（5）了解耦合场的基础知识，了解常见的耦合场求解方法及其每种方法的优缺点，掌握热应力分析的主要步骤及与通常非耦合场分析的差异，并通过实例操作具备分析简单热应力

问题的能力。

学好、用好 ANSYS 热分析功需要首先了解热分析的基础知识，然后通过加强专业学习的同时提高实际动手的能力，在实践中提高使用 ANSYS 进行热分析的能力。

6.7 习题

1.



习题图 6-1 稳态热传导分析

如习题图 6-1 所示，一个厚半中间有一个小孔，模型及其边界条件如习题图所示。

单元：选取 Quad 4node 55 单元用于热分析。

材料：热传导系数 1# 材料 KXX=20，2# 材料为 Kxx=50，顶边转换系数 h=150.

约束：底边绝热，其他边热边界如图所示

热源：沿小孔内边有一热源，热功率为 100W/m^2

要求：复合板的温度场

提示：稳态热传导分析。

2. 复合材料墙广泛应用于寒冷地区建筑，使建筑物与周围的冷环境隔离，减少热损失，降低能耗。一般的复合材料墙大致结构如下。墙内部主要为绝热材料，一般两层交叉排列。本题中取墙的一段进行分析，评估墙的保暖性。

材料参数：复合材料墙的外部材料为钢，导热系数为 W/m K 。绝热材料的导热系数为 0.1W/m K 。

约束：外界环境温度为 220k ，Film Coefficient 为 $200\text{ W/m}^2\text{K}$ 。右侧室内温度为 300k ，Film Coefficient 为 $20\text{ W/m}^2\text{K}$ 。墙的两侧为对流传热。

几何参数：几何参数如习题图 6-2 所示。

要求：沿长度方向热流场；复合材料的温度场；绘制热流矢量图。

提示：不考虑时间因素，分析类型为稳态热传导分析。

3. 分析水坝渗漏情况，计算并绘制大坝下的多空隙土壤内的渗漏速度场。

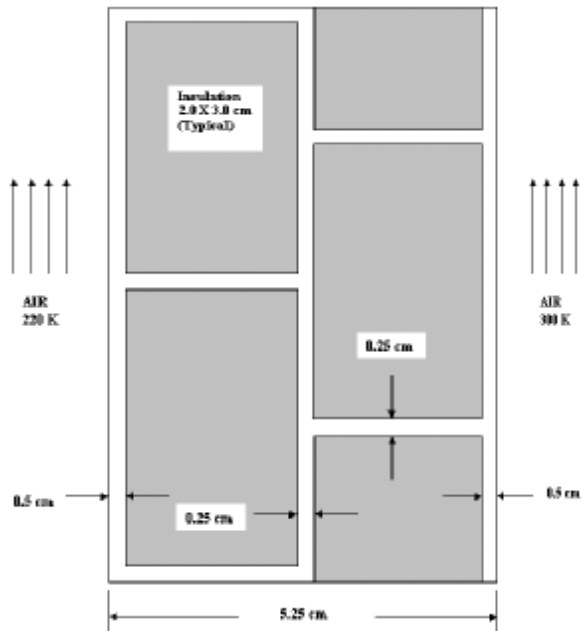
单元：单元参考热场分析所用单元

几何参数：大坝尺寸如上图所示，单位为 m。

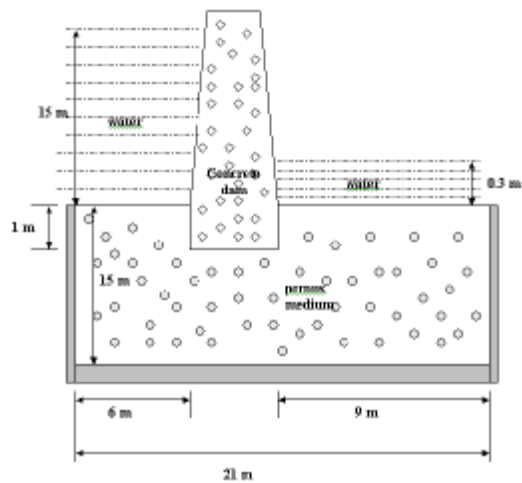
多空隙土渗透性：10

要求： 绘制坝下渗漏速度场。绘制渗漏出口处速度变化曲线（坝至右侧多空隙图边缘，长度 9m）

提示：此问题可以视为热场分析。坝视为绝热体，水压视为温度边界。渗透性视为导热系数。



习题图 6-2 复合保暖墙



习题图 6-3 渗漏分析

4. 瞬态传热模型如习题图 6-4 所示。

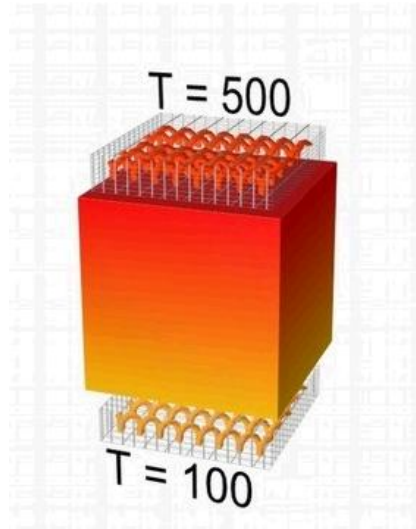
几何参数：边长为 1m 的立方体。

材料参数：Thermal conductivity (K) = 5 W/m*K, 材料密度为 920 kg/m³, specific heat capacity (c) = 2.040 kJ/kg*K。

约束 (热载荷)：材料的初始温度为 20℃, 上侧面突然施加 500℃ 的温度场, 下侧面突然施加 100℃ 温度场, 其他面绝热。

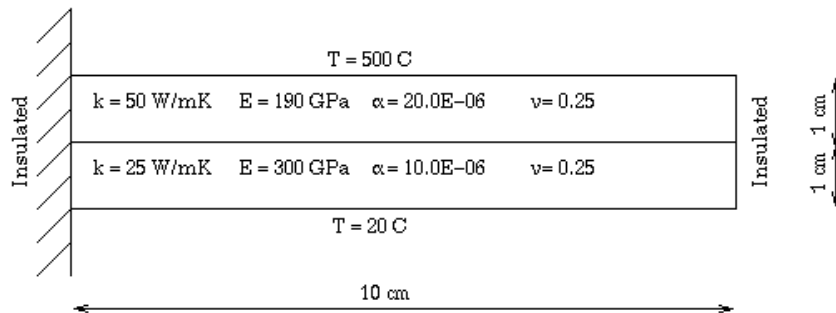
要求：求 300s 后，立方体的温度场并动画显示 0~300s 立方体的温度变化；绘制立方体中心温度随施加变化曲线。

提示：将立方体简化为二维模型分析。



习题图 6-4 瞬态传热分析模型

5.



习题图 6-5 热-结构耦合分析

如习题图 6-5 所示，复合板由不同材料构成的，每种材料的热膨胀系数不同，因此在加热膨胀会产生应力差别，造成板弯曲变形。

单元：采用热-结构分析常用单元，Plane55。

几何参数：所有几何参数如上图所示，单位为 cm。

边界条件：板左端刚性固定而且绝热，板右端自由同样绝热。上下两边处于恒定温度场，大小如上图所示。两种材料之间理想粘合，不会开裂。

材料参数：如习题图 6-5 所示。

要求：得到复合板的温度场、应力场（主应力和等效应力），最大应力位置。

提示：涉及到热-应力耦合分析，需要进行耦合分析；注意所用参数单位！