



# 土木建筑工程CAE

## 第五章 有限元计算与分析

清华大学土木工程系

胡振中

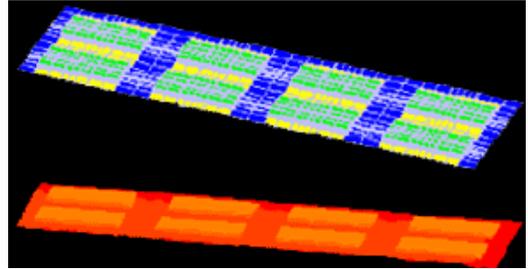
huzhenzhong@tsinghua.edu.cn

Tsinghua University



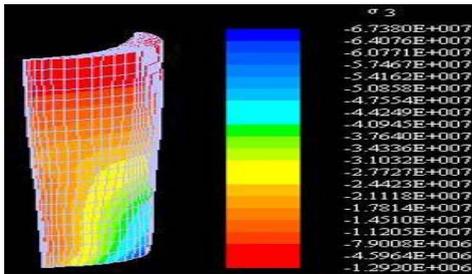
## 第五章 有限元计算与分析

### ❖ 半导体芯片温度场的数值仿真



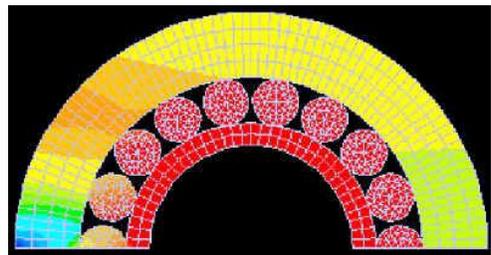
## 第五章 有限元计算与分析

### ❖ 水轮机叶轮的受力分析模拟



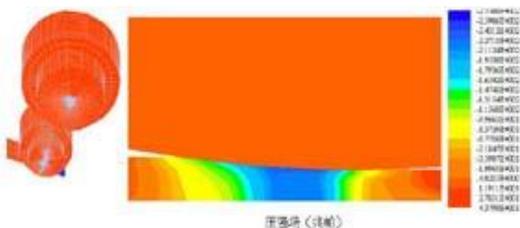
## 第五章 有限元计算与分析

### ❖ 轴承强度分析



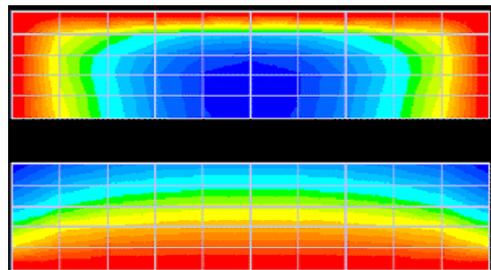
## 第五章 有限元计算与分析

### ❖ 钢板精轧机热轧制有限元分析



## 第五章 有限元计算与分析

### ❖ 聚酰亚胺复合材料反应加工过程的数值模拟



第五章 有限元计算与分析

❖ PBX材料损伤蠕变特性研究

Contour Plot of  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$

第五章 有限元计算与分析

❖ 三维椭圆封头开孔补强

$\sigma_{\max}$

第五章 有限元计算与分析

❖ 上海环球金融中心

第五章 有限元计算与分析

❖ 广州珠江新城西塔

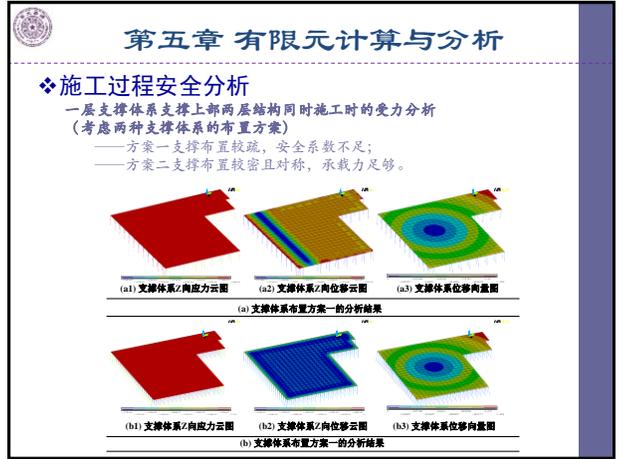
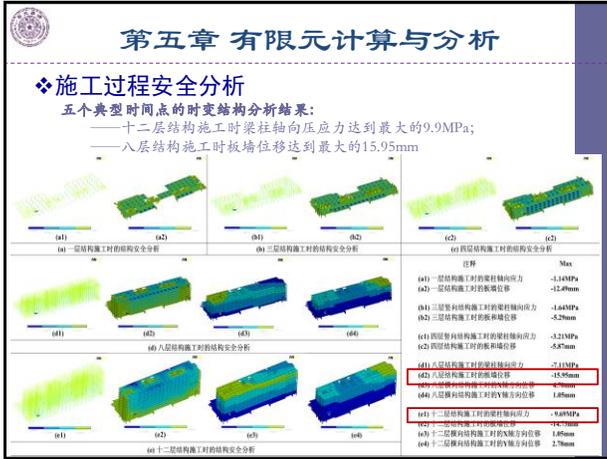
第五章 有限元计算与分析

❖ 国家体育场有限元模型

图1 国家体育场 ANSYS 计算模型

第五章 有限元计算与分析

❖ 倒塌分析



### 第五章 有限元计算与分析

#### 5-1 有限元技术概述

#### 5-2 前处理——有限元建模

#### 5-3 求解——加载和计算分析

#### 5-4 后处理——有限元分析的可视化

#### 5-5 通用有限元分析程序ANSYS

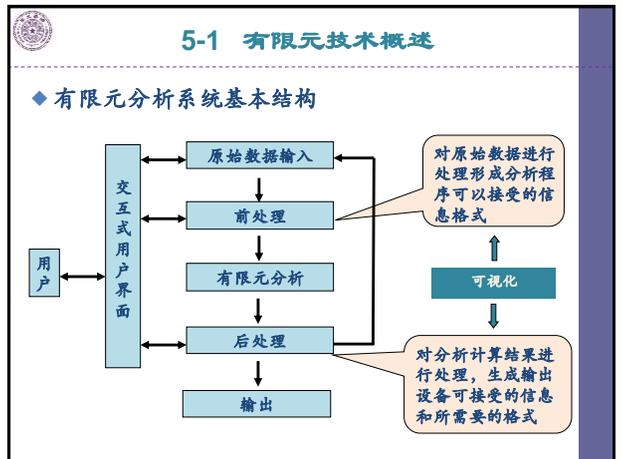
### 5-1 有限元技术概述

- 有限元法是一种数值离散化方法，是力学和计算机技术相结合的产物，是CAD的重要组成部分。
- 有限元法的基本原理
- 有限元分析系统的基本结构
- 常用的有限元软件

### 5-1 有限元技术概述

#### ◆ 基本原理

- 将整个结构划分为若干数量和尺寸有限的规则小块，称为**单元**。这些单元可以是杆件、多边形、多面体等。  
 ---- **离散化**
- 假设单元与单元之间在节点上相连接。
- 把节点力或节点位移作为未知数，(分别称为力法或位移法)，将单元内部的应力表达成节点力或节点位移的函数。
- 在单元内和总体结构满足平衡、连续、协调条件下，求出节点力或节点位移，最后计算各单元的应力。





## 5-1 有限元技术概述

### ◆ 有限元软件

- 德国的ASKA
- 英国的PAFEC
- 法国的SYSTUS
- 美国的ABQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ETABS以及MARC和STARDYNE等
- 中国的PKPM、TUS（已停产后被收购）、YJK



## 5-2 前处理——有限元建模

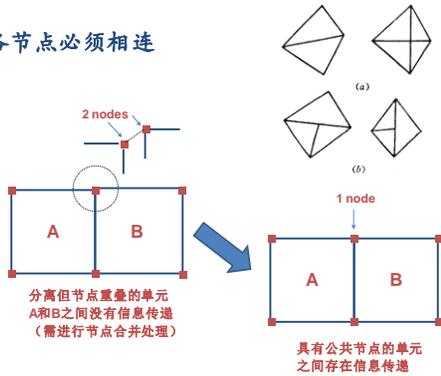
### ◆ 前处理

- 交互式构造结构的几何模型；
- **几何模型离散化**：自动生成有限元单元，进行单元编码和节点优化排序；
- 交互式生成有限元模型的属性数据：包括材料特性、单元截面特性；
- 有限元模型及数据的自动检查；
- 有限元模型的真实图形显示和查询；
- 建立**有限元模型公共数据库（规格化数据文件）**，生成有限元分析系统数据输入格式。



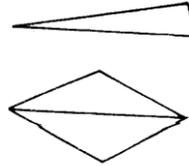
## 几何模型离散化:有限元网格划分的原则

### ◆ 各节点必须相连



## 几何模型离散化:有限元网格划分的原则

### ◆ 单元不能奇异，也就是单元中的边长不能相差太大，或者有过大的钝角或过小的锐角



## 几何模型离散化:有限元网格划分的原则

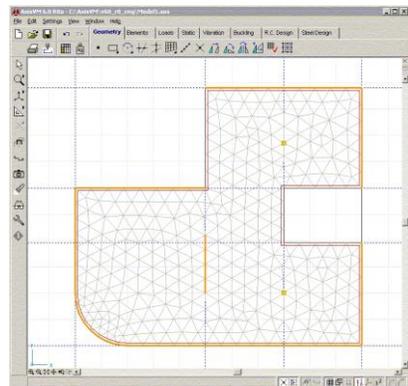
### ◆ 单元的大小、数目取决于计算精度要求和计算容量限制

- 分网时首先满足计算精度的要求，同时可利用结构的对称性、循环对称性的特点，从厚结构中取出一部分进行分析，或者对有应力集中的构件，采用疏密不同的网格划分。也可以采用子结构法。

- ◆ 同一单元内的结构，几何特性与材料特性相同，也就是不要把厚度不同或材料不同的区域划分在同一个单元里。

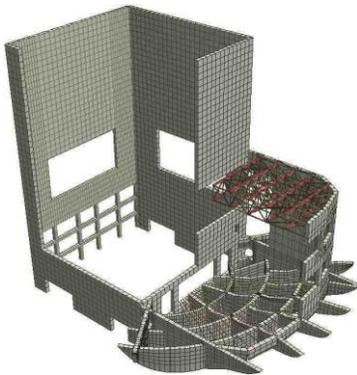


## 几何模型离散化:实例





## 几何模型离散化:实例



## 几何模型离散化:有限元网格自动生成

### ◆ 映射法

#### ■ 基本步骤:

- 通过适当的映射函数将待剖物理域映射到参数空间中形成规则参数域;
- 对规则参数域进行网格剖分;
- 将参数域的网格反向映射回物理空间,从而得到物理域的有限元网格。

#### ■ 分类:

- **共形(保角)映射法**(Conformal mapping approach): 能够处理多于4条边的单连域问题,但难以控制单元形状和单元密度,不能直接应用于三维问题。



## 有限元网格自动生成:映射法

- **基于偏微分法**(P. D. E.-based method): 通过数值求解偏微分方程得到参数空间与物理空间的映射关系。包括椭圆型、抛物线型、双曲线型
- **代数插值法**(Algebraic interpolation method): 通过代数插值描述参数空间与物理空间的映射关系

#### ■ 特点:

- 算法简单、速度快、单元质量好、密度可控制
- 既是结构化网格生成方法,又是非结构化网格生成方法
- 既可生成四边形单元网格,又可生成六面体网格
- 可用于曲面网格生成,还可与形状优化算法集成
- 一般可处理单连域问题,但对于复杂多连通域问题,需要先用手工或自动方法将待剖域分解成几何形状规则的可映射子区域



## 有限元网格自动生成:栅格法

### ◆ 栅格法 Grid-based approach

#### ■ 基本思路:

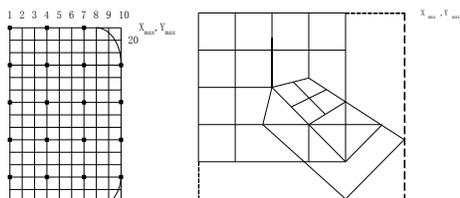
- 用一组不相交的尺寸相同或不同的栅格覆盖在目标区域上面,保留完全或部分落在目标区域的栅格,删除完全落在区域之外的栅格;
- 对与物体边界相交的栅格进行调整、裁剪、再分解等操作,使其更准确地逼近目标区域;
- 对内部栅格和边界栅格进行栅格级的网格剖分,进而得到整个目标区域的有限元网格。



## 有限元网格自动生成:栅格法

#### ■ 分类:

- **正则栅格法**: 采用尺寸相同的正则栅格覆盖目标区域。
- **有限四(八)叉树法**: 采用基于四(八)叉树数据结构的可递归细分的变尺寸栅格覆盖目标区域。能够更好地协调边界逼近精度与生成单元数量之间的平衡。



高层建筑筏板基础



## 有限元网格自动生成:栅格法

#### ■ 基本步骤:

- (1) 生成一个包含整个边界的多边形网格网;
- (2) 对多边形网格的单元与节点进行编号;
- (3) 判断各个节点与边界的关系(节点在边界上、边界内、边界外);
- (4) 判断各个四边形单元与边界的关系(单元在边界上、边界内、边界外);
- (5) 对于在边界上的单元,求其与边界线的交点,将该单元切割为边界内多边形与边界外多边形;
- (6) 切割后生成的边界内多边形,再分割成若干个凸四边形与三角形;
- (7) 删除所有的边界外多边形,得到有限元网格;
- (8) 对有限元网格的节点与单元进行优化编号。



### 有限元网格自动生成：拓扑分割法

#### ◆ 拓扑分割法 Topology decomposition approach

- 该方法假定最后网格顶点全部由目标边界顶点组成，则可以用一种三角形算法将目标用尽量少的三角形完全分割覆盖。
- 这些三角形主要由目标的拓扑结构决定，则目标的复杂拓扑结构被分解成简单的三角形拓扑结构。
- 该方法生成的网格一般很粗糙，必须与其他方法相结合，通过网络加密等过程，才能生成合适的网格。
- 发展为普遍使用的目标初始三角化算法，用来实现从实体表述到初始三角化表述的自动化转换。



### 有限元网格自动生成：节点联元法

#### ◆ 节点联元法 Node connection approach

##### ■ 思路

- 生成节点：首先在区域内生成一定数目的节点，节点要基本均匀，节点之间的连线不能交叉；
- 通过适当的算法连接成有限元单元。

##### ■ 步骤

##### (1) 在边界上均匀地生成节点（求等分点）

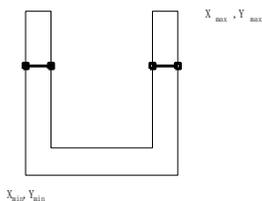
##### (2) 生成内部节点

- 求等距扫描线： $N=(Y_{max}-Y_{min})/E_s$
- 扫描线方程： $Y = Y_i = Y_{min} + (Y_{max}-Y_{min}) \cdot i/N$



### 有限元网格自动生成：节点联元法

- 利用扫描线  $Y = Y_i$  与图形内外边界求交（外边界交点为辅助点）
- 对同一扫描线上的交点进行排序，构成可分布线段。
- 在可分布线段上均匀布点，生成内部节点。



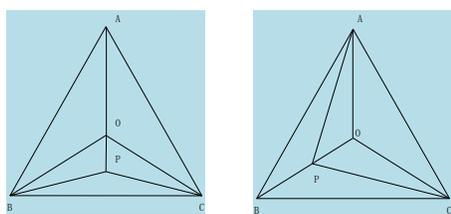
### 有限元网格自动生成：节点联元法

#### (3) 三角剖分

- 生成初始三角形，该三角形应包含所有离散点。根据  $X_{min}$ 、 $Y_{min}$ 、 $X_{max}$ 、 $Y_{max}$  生成包容盒的外接圆  $C$ ，再求  $C$  的外切三角形。
- 从初始三角形内找出第一点  $O$ ，分别与三角形的三个顶点相连，形成三个新的三角形（ $OAB$ 、 $OBC$ 、 $OCA$ ）。
- 找出第二个离散点  $P$  所在的三角形，生成新的三角形（ $POB$ 、 $PBC$ 、 $PCO$ ），若  $P$  落在三角形边上（如  $OB$  上），则可找出与  $OB$  相邻且异于  $OBC$  的三角形如  $OAB$ ，然后连接  $AP$  及  $PC$ 。



### 有限元网格自动生成：节点联元法



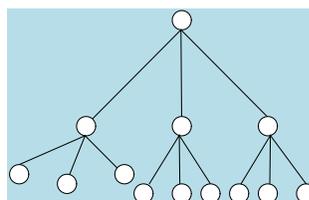
- 判断是否为最后一个点，若不是，则返回第③步。



### 有限元网格自动生成：节点联元法

#### 两个问题：

- 判断  $P$  点落在哪个三角形或三角形的边上，利用二叉树数据结构，从树根开始查找，查找一直到树叶为止。

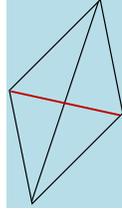
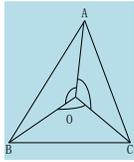
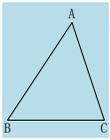


二叉树数据结构



### 有限元网格自动生成：节点联元法

- 判断方法：三角之和是否等于 $360^\circ$ 。
- 三角形优化：判断相邻三角形的多边形，用短对角线代替其对角线。



### 有限元网格自动生成：几何分解法

#### ◆几何分解法 (Geometry decomposition approach)

- 在这种方法中，节点与单元同步生成，与拓扑分解法不同的是在实体分解过程中，考虑了所生成的单元形状及大小，确保生成的单元质量。
- 分类：
  - 区域递归细分法 (Recursive subdivision method)
  - 单元迭代移去法 (Element removing method)
  - 子区域移去及其网格化法 (Subdomain removing method)



### 规格化数据文件

#### ◆ ANSYS-APDL

- APDL是ANSYS参数化设计语言 (ANSYS Parameter Design Language) 的简称
- 是一种类似FORTRAN的解释性语言
- 可作为ANSYS的二次开发工具
- APDL编写的脚本程序可自动完成大部分图形用户界面 (GUI) 操作任务，甚至是某些GUI无法实现的功能，如参数化建模和求解控制等。



### 规格化数据文件

#### ◆ ANSYS-APDL

- 重复执行一条命令
- 宏程序
- 选择结构if-then-else
- 循环结构do-loop
- 可以对标量、矢量、矩阵等进行代数运算
- 对ANSYS的有限元数据库进行访问
- 不受软件版本和系统平台的限制
- 特别适用于复杂模型及模型需要多次修改重复分析的问题。



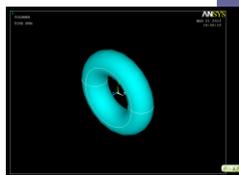
### 规格化数据文件

#### ◆ ANSYS-APDL示例

```
FINI           !退出以前的模块
/CLEAR,START  !清除系统中的所有数据，重新读取启动文件设置
/FILNAME,EG1_1.1 !指定文件名，启动新的日志文件和错误文件

RI=20         !圆环体的内径
RO=80         !圆环体的外径
RM=200        !圆环体的主半径

/PREP7        !进入前处理模块
TORUS,RI,RO,RM,0,360 !建立一个完整的轮环体
/VIEW,1,1,1,1 !改变视图方向
/REP          !重新绘图
FINI         !退出前处理模块
```



### 规格化数据文件

#### ◆ ANSYS-APDL常用命令

K—Keypoints: 关键点	R—Real constant: 实常数
L—Lines: 线	CP—Coupled degrees of Freedom: 自由度耦合
A—Area: 面	CE—Constraint Equation: 约束方程
V—Volumes: 体	D—Dof constraint: 约束
E—Elements: 单元	F—Force load: 集中力
N—Nodes: 节点	SF—Surface Force on nodes: 表面荷载
CM—CoMponent: 组元	BF—Body Force on nodes: 体荷载
ET—Element Type: 单元类型	IC—Initial Conditions: 初始条件
MP—Material Property: 材料属性	



## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k

```

PROGRAM INFORMATION
PROGRAM "ETABS" VERSION "9.1.0"

$ CONTROLS
UNITS "M" "MM"
PREFERENCE MERGETOL 100
RLLF METHOD "INSEQUENCERFROMTOP"

$ STORIES -AN SEQUENCE FROM TOP
STORY "1STORY" HEIGHT 3000 MASTERSTORY "Yes"
STORY "2STORY" HEIGHT 3000 SIMILARTO "1STORY"
STORY "3STORY" HEIGHT 3000 SIMILARTO "1STORY"
STORY "4STORY" HEIGHT 3000 SIMILARTO "1STORY"
STORY "5STORY" HEIGHT 3000 SIMILARTO "1STORY"
STORY "6STORY" HEIGHT 3000 SIMILARTO "1STORY"
STORY "BASE" ELEV 0

$ DIAPHRAGM NAMES
DIAPHRAGM "D1" TYPE RIGID

$ GRIDS
COORDSYSTEM "GLOBAL" TYPE "CARTESIAN" BUBBLESIZE 150
GRID "GLOBAL" LABEL "0" DIR "X" COORD 0 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "DEFAULT" GRIDHIDE "NO"
GRID "GLOBAL" LABEL "1" DIR "Y" COORD 0 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "DEFAULT" GRIDHIDE "NO"
GRID "GLOBAL" LABEL "2" DIR "Z" COORD 0 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "DEFAULT" GRIDHIDE "NO"
GRID "GLOBAL" LABEL "3" DIR "X" COORD 3000 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "SWITCHED" GRIDHIDE "NO"
GRID "GLOBAL" LABEL "4" DIR "Y" COORD 3000 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "SWITCHED" GRIDHIDE "NO"
GRID "GLOBAL" LABEL "5" DIR "Z" COORD 3000 GRIDTYPE "PRIMARY" BUBBLELOC "SWITCHED" GRIDHIDE "NO"
  
```

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k

```

$ ANALYSIS OPTIONS
ACTINPROP "ON BY 02 03 BY 02"
SPINMCS PROCS 12 MODETYPE "EIGEN" TOL 0.00001
MSCOPTIONS GRAVITY 9806.65 SOURCE "LOADS" LATERALONLY "YES" STORYLEVELONLY "YES"
MSCOPTIONS LOAD "READ" FACTOR 1
MSCOPTIONS LOAD "LIVE" FACTOR .5

$ LOAD COMBINATIONS
LOAD "DEAD1" TYPE "ADD" DESIGN "CONCRETE"
COMBO "DEAD1" LOAD "READ" SF 1.35
COMBO "DEAD1" LOAD "LIVE" SF 1.0
LOAD "DEAD2" TYPE "ADD" DESIGN "CONCRETE"
COMBO "DEAD2" LOAD "READ" SF 1
COMBO "DEAD2" LOAD "LIVE" SF 1.5

$ GENERAL DESIGN PREFERENCES
GENERALPREFERENCE STRUCTURALSYS "FRAME-SHEARWALL" TALLBUILDING "YES" TALLBUILDINGCLASS "B" CANNUM 0 1
GENERALPREFERENCE FIELDTYPE "I" SELECTIONGROUP "I" GROUNDSTORY "STORY1"
GENERALPREFERENCE SELECTIONSTORY "STORY1"

$ STEEL DESIGN PREFERENCES
STEELPREFERENCE CODE "Channel 200" TUBESION "EVERYSTEP" FRAMETYPE "MOMENT FRAME"
STEELPREFERENCE COMBINATION 1 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 1 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 2 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 3 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 4 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 5 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 6 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 7 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 8 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 9 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 10 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 11 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 12 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 13 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 14 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 15 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 16 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 17 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 18 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 19 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 20 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 21 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 22 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 23 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 24 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 25 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE CALCULATECARRIER "NO" PERCENTCARRIER 1 CARRIERWALLLIMIT 100 CARRIERWALLLIMIT 15
STEELPREFERENCE CARRIERWALLLIMIT 100 CARRIERWALLLIMIT 15 CARRIERWALLLIMIT 15
STEELPREFERENCE PATENTFLG 0 INVESTITATION 1 SHAPELIMIT .95

$ CONCRETE DESIGN PREFERENCES
  
```

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k

```

$ LOAD COMBINATIONS
LOAD "DEAD1" TYPE "ADD" DESIGN "CONCRETE"
COMBO "DEAD1" LOAD "READ" SF 1.35
COMBO "DEAD1" LOAD "LIVE" SF 1.0
LOAD "DEAD2" TYPE "ADD" DESIGN "CONCRETE"
COMBO "DEAD2" LOAD "READ" SF 1
COMBO "DEAD2" LOAD "LIVE" SF 1.5

$ GENERAL DESIGN PREFERENCES
GENERALPREFERENCE STRUCTURALSYS "FRAME-SHEARWALL" TALLBUILDING "YES" TALLBUILDINGCLASS "B" CANNUM 0 1
GENERALPREFERENCE FIELDTYPE "I" SELECTIONGROUP "I" GROUNDSTORY "STORY1"
GENERALPREFERENCE SELECTIONSTORY "STORY1"

$ STEEL DESIGN PREFERENCES
STEELPREFERENCE CODE "Channel 200" TUBESION "EVERYSTEP" FRAMETYPE "MOMENT FRAME"
STEELPREFERENCE COMBINATION 1 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 1 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 2 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 3 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 4 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 5 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 6 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 7 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 8 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 9 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 10 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 11 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 12 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 13 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 14 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 15 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 16 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 17 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 18 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 19 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 20 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 21 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 22 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 23 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 24 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE COMBINATION 25 COMEBORDER "YES" BEAMSFLZCOMPRESSION "NO"
STEELPREFERENCE CALCULATECARRIER "NO" PERCENTCARRIER 1 CARRIERWALLLIMIT 100 CARRIERWALLLIMIT 15
STEELPREFERENCE CARRIERWALLLIMIT 100 CARRIERWALLLIMIT 15 CARRIERWALLLIMIT 15
STEELPREFERENCE PATENTFLG 0 INVESTITATION 1 SHAPELIMIT .95

$ CONCRETE DESIGN PREFERENCES
  
```

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k文件解析

e2k文本文件由38个分项组成，包括：文件、程序、控制、楼层、材料、截面、点、线、面等。其详细解析如下所示（仅列出与建模相关的条目）。

**符合说明：**

( ) —— 分类题目

{ } —— 变量参数

[A/B/C/...] —— 可选A/B/C/...

—— 可有可无

①/②/... —— 情况①/情况②

—— 相似数组

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k文件解析

- 文件信息 (FILE INFORMATION)
- 程序信息 (PROGRAM INFORMATION)
- 控制信息 (CONTROLS)
  - UNITS {force} [length]
  - TITLEI [title]
  - PREFERENCE MERGETOL [tol]
  - RLLF METHOD [method name]
- 楼层信息 (STORIES - INSEQUENCERFROMTOP)
  - STORY [name] [HEIGHT / ELEV] [value] MASTERSTORY "Yes" SIMILARTO "same"
- 刚性隔架信息 (DIAPHRAGM NAMES)
  - DIAPHRAGM [name] TYPE [RIGID / SEMIRIGID]
- 网格信息 (GRIDS)
  - COORDSYSTEM "GLOBAL" TYPE ["CARTESIAN" / "CYLINDRICAL"] BUBBLESIZE [size]
  - GRID "GLOBAL" LABEL [name] DIR ["X" / "Y"] COORD [coord]
  - GRIDTYPE ["PRIMARY" / "SECONDARY"] BUBBLELOC ["DEFAULT" / "SWITCHED"]
  - GRIDHIDE ["NO" / "YES"]
  - REFERENCEPLANE Z [elev]

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k文件解析

- 材料属性 (MATERIAL PROPERTIES)
  - MATERIAL [name] M [mass] W [weight]
  - TYPE ["ISOTROPIC"① / "ORTHOTROPIC"②]
- 框架截面信息 (FRAMESECTION S)
  - FRAMESECTION [name] MATERIAL [mat] SHAPE {系统默认截面类型 / "Rectangular"① / "Channel" / "Tee" / "Angle" / "BoxTube"② / "Double Angle"③ / "Pipe"④ / "Circle"⑤ / "General" / "SD Section" / "Nonprismatic" / "IWide Flange"⑦}
  - FRAMESECTION [name] SHAPE "Auto Select List"
  - FRAMESECTION [name] SHAPE "Nonprismatic"
  - FRAMESECTION [name] AMOD [a] A2MOD [a] A3MOD [a] AMOD [i] J2MOD [i] J3MOD [i] MMOD [m] WMOD [w]
- 自动选择截面列表信息 (AUTO SELECT SECTION LISTS)
  - AUTOSECTION [name] {sname1} {sname2} .....
- 钢筋定义信息 (REBAR DEFINITIONS)
  - REBAR DEFINITIONS [name] AREA [area] DIA [d]
- 混凝土截面信息 (CONCRETE SECTIONS)
  - CONCRETE SECTION [name] TYPE ["COLUMN"① / "BEAM"②]

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k文件解析

- 自定义截面信息 (SECTION DESIGNER SECTIONS)
- 墙板属性 (WALL/SLAB/DECK PROPERTIES)
  - SHELLPROP {name} MATERIAL{"CONC"/"STEEL"/"OTHER"}
  - PROPTYPE{"WALL"/"SLAB"/"DECK"}@1
- 连接属性 (LINK PROPERTIES)
- 支模/外墙名 (PIER/SANDREL NAMES)
- 点坐标 (POINT COORDINATES)
  - POINT {name} {x} {y} {z}
- 线连接 (LINE CONNECTIVITIES)
  - LINE {name} [COLUMN / BEAM / BRACE] [pt1Name] [pt2Name] [Is Start Pt Below Story]
- 面连接 (AREA CONNECTIVITIES)
  - AREA {name} {type} [LELOOR/AREA] [Number of Points] [ptName Is Below Story]
- 组 (GROUPS)
- 点指定 (POINT ASSIGNS)
  - POINTASSIGN {name} [p story]
- 线指定 (LINE ASSIGNS)
  - LINEASSIGN {lineName} [story] SECTION {secName} ANG {angle} MINNUMSTA {minnumsta}
- 面指定 (AREA ASSIGNS)
  - AREAASSIGN {"area"} [{"story"}] SECTION {secName} {"NONE"}@1
  - (根据{type}后面可能还有参数 PIER {PName})

## 规格化数据文件

### ◆ Etabs-e2k文件解析

- 静荷载 (STATIC LOADS)
- 点荷载 (POINT OBJECT LOADS)
- 线荷载 (LINE OBJECT LOADS)
- 面荷载 (AREA OBJECT LOADS)
- 分析设置 (ANALYSIS OPTIONS)
- 函数 (FUNCTIONS)
- 反应谱 (RESPONSE SPECTRUM CASES)
- 静态非线性 (STATIC NONLINEAR CASES)
- 荷载组合 (LOAD COMBINATIONS)
- 一般设计设置 (GENERAL DESIGN PREFERENCES)
- 钢结构设计设置 (STEEL DESIGN PREFERENCES)
- 混凝土设计设置 (CONCRETE DESIGN PREFERENCES)
- 组合结构设计设置 (COMPOSITE DESIGN PREFERENCES)
- 墙结构设计设置 (WALL DESIGN PREFERENCES)
- 标准轴 (DIMENSION LINES)
- 展开立面定义 (DEVELOPED ELEVATIONS)

## 5-3 求解——加载和计算分析

### ◆ 求解

- 加载和边界约束：定义边界约束条件，施加单元、节点荷载。
- 求解方法
  - 高斯消去法等求解线性代数方程组
  - 子空间迭代法求自振频率
  - 逐步积分法计算动力响应
  - 振型分解反应谱法求解地震响应
  - 等弧长法跟踪平衡路径
  - 矩阵的半带宽优化
- 计算参数：选择计算和分析参数，如弹性/弹塑性分析、荷载步、大变形开关、收敛准则、非线性迭代的最大循环次数.....

## 有限元方程的解法

计算流程

```

    graph TD
      Start[启动] --> Input[输入数据]
      Input --> Matrix[形成刚度矩阵]
      Matrix --> Load[形成载荷列阵]
      Load --> Boundary[引入边界条件]
      Boundary --> Solve([解方程 Kδ = R])
      Solve --> Displacement[打印位移]
      Displacement --> Stress[计算应力]
      Stress --> PrintStress[打印应力]
      PrintStress --> Stop[停机]
  
```

## 有限元方程的解法

有限元分析的效率很大程度上取决于求解这个庞大的线性代数方程组且解方程组时在整个解题时间中占有很大比重。

求解线性代数方程组的方法：

- 直接法
  - 是通过有限个算术运算来求出方程组的解。当方程组的阶数不太高时，采用高斯消去法、三角分解法。阶数高的话，可采用以这两种方法为基础的波前法、块追赶法和子结构法。而当方程阶数过高时，由于计算机有效位数的限制，直接法中的舍入误差，消元中的有效位数的限制，会影响求解的精度，这时可采用迭代法。
- 迭代法：
  - 迭代法是用某极限过程去逐步逼近真实解，如塞得尔法和超松弛法。

## 有限元方程的解法——高斯消去法

高斯消去法的基本思想是逐步逐次消去一个未知数，最后将原方程变成一个的等价的三角形方程，再逐个回代，单元能解出全部的未知数。

设刚度方程为：

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \cdot \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ R_n \end{bmatrix}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

将上式改写成：

$$\begin{cases} K_{11}\delta_1 + K_{12}\delta_2 + \dots + K_{1n}\delta_n = R_1 \\ K_{21}\delta_1 + K_{22}\delta_2 + \dots + K_{2n}\delta_n = R_2 \\ \vdots \\ K_{n1}\delta_1 + K_{n2}\delta_2 + \dots + K_{nn}\delta_n = R_n \end{cases}$$

由于有限元法中，由于刚度矩阵为正定矩阵，即：

$$K_{11} > 0 \quad \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{vmatrix} > 0 \quad \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{vmatrix} > 0$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

因此可采用高斯消去法求解：

用 $K_{11}$ 除第1式则：
$$\delta_1 + \frac{K_{12}}{K_{11}}\delta_2 + \dots + \frac{K_{1n}}{K_{11}}\delta_n = \frac{R_1}{K_{11}}$$

故：
$$\delta_1 = -\frac{K_{12}}{K_{11}}\delta_2 - \dots - \frac{K_{1n}}{K_{11}}\delta_n + \frac{R_1}{K_{11}}$$

将上式代入2~n式中得：

$$(K_{22} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{11}})\delta_2 + \dots + (K_{2n} - \frac{K_{21}K_{1n}}{K_{11}})\delta_n = R_2 - \frac{K_{21}}{K_{11}}R_1$$

$$\vdots$$

$$(K_{n2} - \frac{K_{n1}K_{12}}{K_{11}})\delta_2 + \dots + (K_{nn} - \frac{K_{n1}K_{1n}}{K_{11}})\delta_n = R_n - \frac{K_{n1}}{K_{11}}R_1$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

原方程成为：

$$\begin{cases} \delta_1 + \frac{K_{12}}{K_{11}}\delta_2 + \dots + \frac{K_{1n}}{K_{11}}\delta_n = \frac{R_1}{K_{11}} \\ (K_{22} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{11}})\delta_2 + \dots + (K_{2n} - \frac{K_{21}K_{1n}}{K_{11}})\delta_n = (R_2 - \frac{K_{21}}{K_{11}}R_1) \\ \vdots \\ (K_{n2} - \frac{K_{n1}K_{12}}{K_{11}})\delta_2 + \dots + (K_{nn} - \frac{K_{n1}K_{1n}}{K_{11}})\delta_n = (R_n - \frac{K_{n1}}{K_{11}}R_1) \end{cases}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{K_{12}}{K_{11}} & \dots & \frac{K_{1n}}{K_{11}} \\ 0 & K_{22} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{11}} & \dots & K_{2n} - \frac{K_{21}K_{1n}}{K_{11}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & K_{n2} - \frac{K_{n1}K_{12}}{K_{11}} & \dots & K_{nn} - \frac{K_{n1}K_{1n}}{K_{11}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_1}{K_{11}} \\ R_2^{(1)} \\ \vdots \\ R_n^{(1)} \end{bmatrix}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

上式中右标 (1)表示第一次消元，这样K阵成为第一列元素，除对角为1外其余均化为零。

第二次消元时：对降过一阶的矩阵进行同样的化简。

此时：

$$K_{22}^{(1)} = K_{22} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{11}} \quad \text{由于} \quad \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{vmatrix} > 0$$

$$\therefore K_{22} - \frac{K_{21}K_{12}}{K_{11}} > 0$$

这样做n次后，就可使矩阵K成为对角线元素均为1的三角阵。这个过程叫消元过程，其具体公式用下列公式表达



### 有限元方程的解法——高斯消去法

第一次消元时：第一行元素：

$$\begin{cases} K_{ij}^{(1)} = \frac{K_{ij}}{K_{11}} \\ R_i^{(1)} = \frac{R_i}{K_{11}} \quad (j=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

其他各行元素为：

$$\begin{cases} K_{ij}^{(1)} = K_{ij} - K_{i1} \frac{K_{1j}}{K_{11}} \\ R_i^{(1)} = R_i - K_{i1} \frac{R_1}{K_{11}} \quad (i=2, 3, \dots, n, \quad j=1, 2, \dots, n) \end{cases}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

第二次消元时：第二行元素

$$\begin{cases} K_{2j}^{(2)} = \frac{K_{2j}^{(1)}}{K_{22}^{(1)}} \\ R_2^{(2)} = \frac{R_2^{(1)}}{K_{22}^{(1)}} \end{cases} \quad (j=2, 3, \dots, n)$$

其他各行元素为

$$\begin{cases} K_{ij}^{(2)} = K_{ij}^{(1)} - K_{i2}^{(1)} \frac{K_{2j}^{(1)}}{K_{22}^{(1)}} \\ R_i^{(2)} = R_i^{(1)} - K_{i2}^{(1)} \frac{R_2^{(1)}}{K_{22}^{(1)}} \end{cases} \quad (i=3, 4, \dots, n, \quad j=2, 3, \dots, n)$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

第n次消元时：第n行元素为：

$$\begin{cases} K_{nn}^{(n)} = \frac{K_{nn}^{(n-1)}}{K_{nn}^{(n-1)}} = 1 \\ R_n^{(n)} = \frac{R_n^{(n-1)}}{K_{nn}^{(n-1)}} \end{cases}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

至此消元过程全部结束得：

$$\begin{bmatrix} 1 & \tilde{K}_{12} & \tilde{K}_{13} & \dots & \tilde{K}_{1n} \\ & 1 & \tilde{K}_{23} & \dots & \tilde{K}_{2n} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & 1 & \tilde{K}_{n-1n} \\ & & & & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_{n-1} \\ \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{R}_1 \\ \tilde{R}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \tilde{R}_{n-1} \\ \tilde{R}_n \end{bmatrix}$$



### 有限元方程的解法——高斯消去法

因此高斯消去法求解方程时分

- 消元 对角元为1的上三角阵
- 回代 对角元为1的单位阵，求节点未知量

回代过程可归纳为如下公式：

$$\delta_i = \tilde{R}_i - \sum_{j=i+1}^n \tilde{K}_{ij} \delta_j \quad (i=n-1, n-2, \dots, 1)$$



### 有限元方程的解法——三角分解法

利用三角分解，将刚阵化为三角阵 $K=LU$ 的一种做法。与高斯法相比，运算量基本相同，而耗时少（程序实现）。

三角分解后，一个成为上三角阵，另一个成为下三角阵，需要两次回代即可求得方程组的解。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{11} & 0 & 0 \\ l_{21} & l_{22} & 0 \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ 0 & u_{22} & u_{23} \\ 0 & 0 & u_{33} \end{bmatrix}$$



### 有限元方程的解法——波前法

以高斯消去法为基础，而发展起来的**解决计算容量不足**的一种新方法。

实施中，将生成的单元刚阵元素分批送入计算机内存，检查有无迭加完毕的自由度，若有则对其进行消元，并送出内存，同时紧凑内存中的其他元素，送入下一批单元刚阵元素，至到最后一个元素被消元，此时消元结束。回代时按相反顺序从外存读入数据进行计算。

与高斯消去法的最大差别是：高斯消去法按自由度编号顺序消元与回代。而波前法则不是，是按自由度完毕迭加的先后顺序消元与回代，同时使用计算机外存。

## 有限元方程的解法——迭代法

它不是方程组的真实解，而是用某一近似值代入，逐步迭代。使近似值逐渐逼近，达到规定误差时，取其为方程组的解。

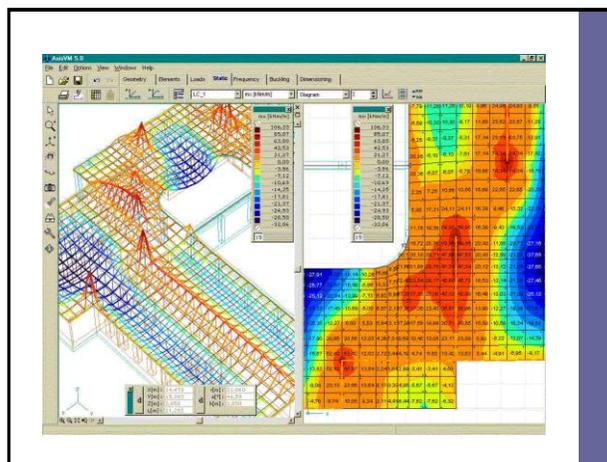
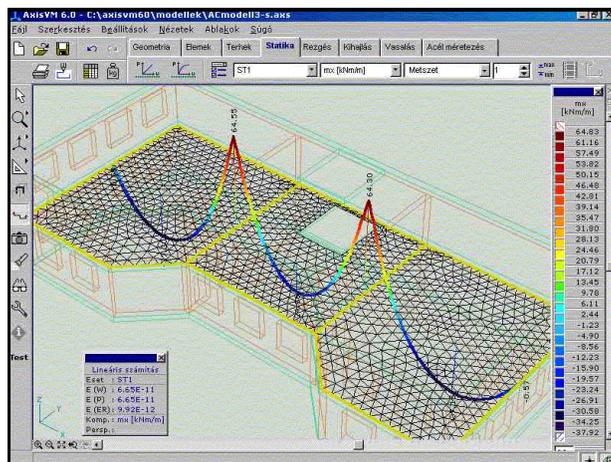
类似于牛顿迭代法。



## 5-4 后处理——有限元分析的可视化

### ◆ 后处理

- ◆ **对结构分析结果数据加工处理：**根据分析计算所得到的节点位移和应力应变，按照一定的强度准则求出设计要求的各种应力值；
- ◆ **结果数据的编辑输出：**提供多种数据输出的编辑功能，按照用户要求有选择地组织、输出有关结果数据，生成表格和文档；
- ◆ **有限元数据的图形表示：**利用计算机图形功能，以二维或三维图形方式，显示计算结果，直观、形象地反映结构受力特性及其状况，如结构变形图、内力图等。



## 有限元后处理系统可视化

### ◆ 网格图

- 网格图是最简单的有限元后处理图形之一。由于数据库保存了网格节点的坐标数据，同时每个单元的边线已经提取，则只需按边线定义的节点索引将相关节点用直线相连，即可获取网格图。

### ◆ 彩色云图

- 彩色云图适合显示标量数据在结构表面的分布情况。在有限元分析中很多结果必须通过彩色云图才能清晰表达，如位移、应力分量等。
- 通过将具有指定范围标量数据的结构表面按某种颜色显示，从而达到显示标量数据在结构表面的分布状态。

## 有限元后处理系统可视化

### ◆ 等值线图

- 等值线图是将结构表面上具有相同标量数据值的点相连接，形成一条曲线。等值线可以是封闭的曲线，或在结构表面的边界终止。

### ◆ 变形图

- 变形图是将结构的变形叠加到结构模型中，只需将每个节点的坐标加上该节点的位移即可。位移分量需按适当比例放大。

### ◆ 内力图

- 表示结构的内力分布情况。

### ◆ 各种标识的显示

- 显示有限元分析中各种标识性信息，如节点标识、单元标识、材料性质等。



## 有限元后处理系统可视化

### ◆ 动画

- 动画用来显示随时间变化的数据场，如有限元分析中，模态分析结果、时程响应分析结果、优化各迭代步的结果等。
- 实际是将一系列的图形按一定的时间间隔连续地绘制出来，利用人眼的视觉残留特点，给人以屏幕图像连续变化的印象。

### ◆ 体绘制图形

### ◆ 矢量场图形



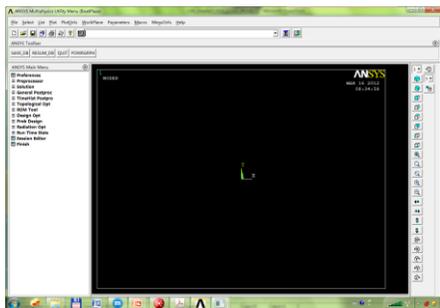
## 5-5 通用有限元分析程序ANSYS

- 大型通用有限元分析软件ANSYS自1971年推出至今，已经发展功能强大、前后处理和图形功能完备的有限元软件，广泛地应用于工程领域。可以分析结构、动力学、传热、热力耦合、电磁耦合、流固耦合等领域的问题。
- ANSYS采用开放式结构：提供了与CAD软件的接口，用户编程接口UPFs，参数化设计语言APDL。
- ANSYS分为系统层，功能模块层两层结构。可以使用图形方式，也可以使用批处理方式。



## 5-5 ANSYS图形界面

ANSYS 图形界面由输出窗口和工具菜单窗口构成，工具菜单窗口由下拉菜单、工具条、主菜单区、视区和辅助工具框构成。



## 5-5 ANSYS学习参考资料

- ANSYS 基本过程手册
- ANSYS 结构分析指南
- ANSYS 结构非线性分析指南
- ANSYS 建模与网格划分指南
- ANSYS 动力学分析指南

- 土研一班有限元讲座系列

——在网络学堂中下载



## 主要参考文献

- 张洪武等，有限元分析与CAE技术基础，清华大学出版社
- 周宁等，ANSYS APDL高级工程应用实例分析与二次开发，中国水利水电出版社，2007
- 北京金土木软件技术有限公司等，ETABS中文版使用指南，中国建筑工业出版社，2004
- 龚景海等，空间结构计算机辅助设计，中国建筑工业出版社，2002
- M. S. Shephard. "Toward Automated Finite Element Modeling for the Unification of Engineering Design and Analysis" FE in A & D. 1986.2.
- J. Suhara, J. Fukuda. "Automated Mesh Generation for Finite Element Analysis" Advances in Computational Methods in Structural Mechanics and Design. 1972.
- D.T. lee and B.J. Schachter. "Two Algorithms for constructing a Delaunary Triangulation". Computer & Information. Sci. Vol 9. No.3. 1980.
- J.C. Carendish "Automatic Triangulation of Arbitrary Planar Domains for the Finite Element Method". International Journal for Numeric Methods in Engineering. vol8 1974.



## 本章学习重点

- 有限元分析的基本原理
- 有限元分析的流程
- 有限元网格划分方法
- 规格化数据文件
- 求解线性代数方程组的方法
- 有限元后处理系统的可视化方法
- ANSYS的基本概念和基本操作



### 提高内容参考

- 编写一个程序，可以实现用三角形或四边形为单元对任意多边形进行网格划分；
- 设计一个统一数据格式（数据库或文本皆可），用于保存有限元前处理的模型信息，并针对Etabs和ANSYS，开发模型接口；
- 选择同一个超高层建筑模型，在至少3个不同的结构分析软件中建立模型，并采用弹塑性时程分析方法计算地震作用，同时，需要分析不同软件间的优缺点；
- 编写一个程序，实现简支梁的受力分析，并用应力云图方式表现其内力分布，用位移图方式表现其挠度。



# 谢谢!

清华大学土木工程系

胡振中

[huzhenzhong@tsinghua.edu.cn](mailto:huzhenzhong@tsinghua.edu.cn)