

# 计算热物理 (II)

## 绪论

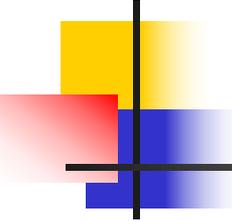
胡茂彬

Email: [humaobin@ustc.edu.cn](mailto:humaobin@ustc.edu.cn)

<http://staff.ustc.edu.cn/~humaobin>

力二楼513

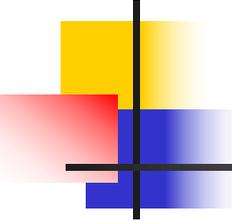
Tel: 63600127



# 教材和参考资料

---

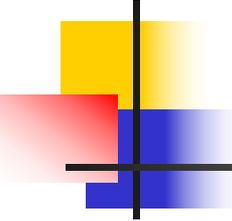
- 教材：《计算热物理引论》-中国科大精品教材，吴清松编。
- 参考书：
  - 《数值传热学》，西安交大出版社，陶文铨
  - 《数值传热学的近代进展》，科学出版社，陶文铨
  - 《传热与流体流动的数值计算》，科学出版社，S.V. Partanka著，张政译。



# 网上资源与交流

---

- 流体中文网: <http://www.cfluid.com/>
- OPENFOAM

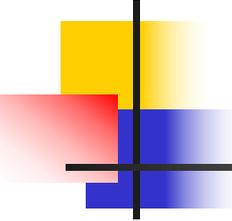


# 考核方式

---

- 占比例：

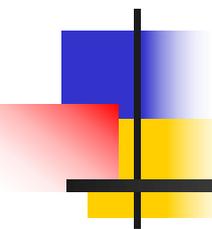
期末考试	50%
大作业（程序设计）	20%
小作业	20%
平时上课	10%



# 几点说明

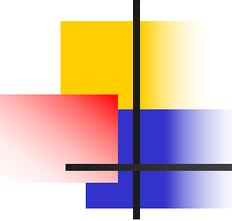
---

- 自己解决计算机上机问题
- 选修学生试听两周，然后填选修单



# 第一章 绪论

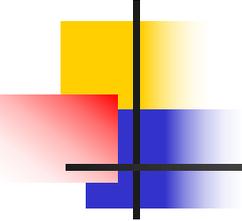
---



# 什么是“计算热物理”

---

- 《计算热物理》(也称《计算传热学》或《数值传热学》)是指用计算机通过数值方法来求解各类热量传递问题的一门《传热学》的分支学科。



---

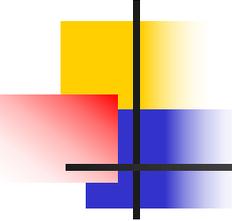
- 从学科内容而言，《计算热物理》研究的基本内容就是《传热学》中的**四大模块**：

- ✓ 热传导

- ✓ 对流换热

- ✓ 辐射换热

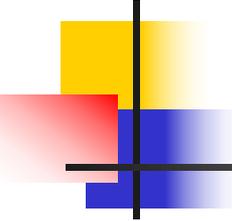
- ✓ 复杂换热过程与各类换热设备的传热特性



# 数值方法的本质

---

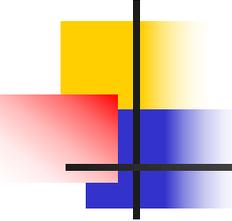
- 离散化 - 解域离散成若干个“元”或“体积”
- 代数化 - 将偏微分方程改造为代数方程



# 导热、对流换热问题的场模拟

---

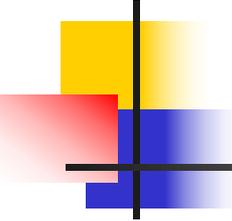
- 有限差分法 (Finite difference method, FDM)
- 有限容积法 (Finite volume method, FVM)
- 有限元法 (Finite element method, FEM)
- 有限分析法 (Finite analytic method, FAM)
- 边界元法 (Boundary element method, BEM)
- 谱分析方法 (Spectral method, SM)
- 数值积分变换法 (Integral transformation method, ITM)
- 格子-Boltzmann方法 (Lattice-Boltzmann method, LBM)



# 1 有限差分法

---

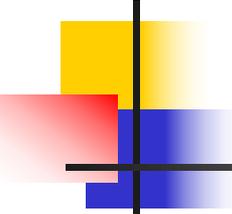
- **基本实施方法为，**
  - ✓ 将求解区域划分为节点、网格
  - ✓ 在节点上，将偏微分方程的每个导数项用差分表达式来代替，从而形成代数方程
  - ✓ 求解代数方程组，获得数值解
- 在规则区域的结构化网格上，有限差分法十分简便而有效，而且很容易引入对流项的高阶格式
- 不足的是守恒性难以保证
- 最严重的缺点：对不规则区域的适应性差



## 2 有限容积法

---

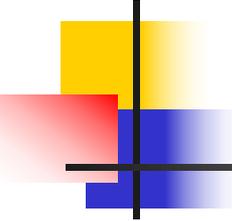
- 有限容积法从守恒型控制方程出发，在控制容积上作积分，积分中引入假设，形成不同格式
- 扩散项多采用线性插值，因而格式的区别主要表现在对流项上
- 可以保证守恒性，对区域形状的适应性好，是目前应用最普遍的一种数值方法



# 3 有限元法

---

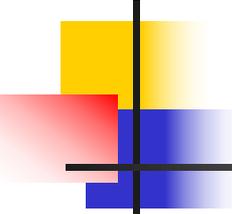
- 有限元法把区域划分成一组离散的元体，通过对控制方程作“加权余量法”积分得出离散方程
- 与有限容积法的主要区别在于：
  - ✓ 对每个元体要选定一个形状函数，并在积分前把形状函数代入控制方程中
  - ✓ 控制方程积分前应乘上一个选定的权函数，并要求在整个区域上控制方程余量的加权平均值为零
- 最大优点：对不规则几何区域的适应性好



# 4 有限分析法

---

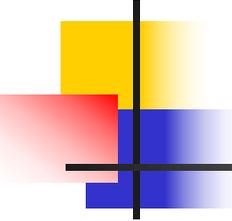
- 每一个节点与其相邻的网格组成一个计算单元
- 在计算单元内把方程的非线性项局部线性化，并对单元边界上未知函数的变化型线作出假设，该单元内问题转化为第一类边界条件问题
- 设法找出其分析解，并找出该单元的内点及邻点上未知函数数值间的代数关系式，这就是该内点的离散方程。对计算区域边界上节点补充一个方程，就完成了整个计算区域的离散方程的建立过程
- 有限分析法可以克服高Reynolds数下有限差分法及有限容积法的数值解容易发散或振荡的缺点，但其计算工作量较大，对计算区域集合形状的适应性也较差



## 5 边界元法

---

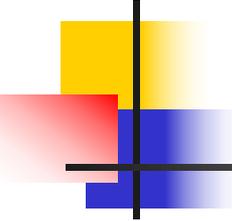
- 在边界元方法中应用格林函数公式，选择适当的权函数把偏微分方程转换为边界上的积分方程，把求解域中任一点的求解变量与边界条件联系起来
- 最大优点：可以使求解问题的空间维数降低一阶，从而使得计算工作量大大减小。
- 最大限制：需要已知所求解偏微分方程的格林函数基本解



## 6 谱分析方法

---

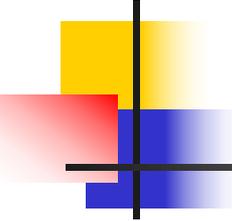
- 被求解的函数用有限项的级数展开来表示，例如傅里叶展开、多项式展开等
- 要建立的代数方程是关于级数中每一项系数的代数方程
- 其优点是可以获得高精度的解，但不适宜用来编制通用程序，目前只在比较简单的流动与传热问题中应用得比较成功



## 7 数值积分变换法

---

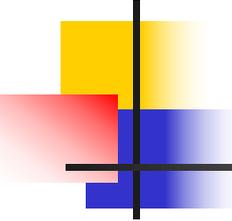
- 这一方法将偏微分方程的解表示成一个特征值问题的解及一个降维的定解问题解的组合
- 其中特征值问题具有分析解，而定解问题需要采用数值解法



## 8 格子-Boltzmann方法

---

- 此方法不再基于连续介质的假设，而是把流体看成是许多只有质量没有体积的**微粒**所组成，这些微粒可以向空间若干个方向任意运动
- 通过质量、动量守恒原理，建立起表征质点在给定的时刻位于空间每一个位置附近的概率密度函数，再统计获得质点微粒的**概率密度分布函数**与宏观运动参数间的关系



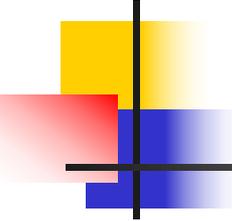
# 热辐射及辐射换热的数值模拟

热辐射及辐射换热是本质上与热传导和对流换热完全不同的一种能量传递方式：

- 导热与对流换热只能发生在直接接触的物体之间
- 导热与对流依靠分子不规则的热运动（声子）或者流体微团的宏观位移（流动）来实现；辐射则是电磁波（光子）的传播，存在着光子与声子、电子、晶格之间的复杂相互作用

工程中常见的辐射换热问题的数学描写可分为三种类型

- 代数方程
- 积分方程
- 积分-微分方程

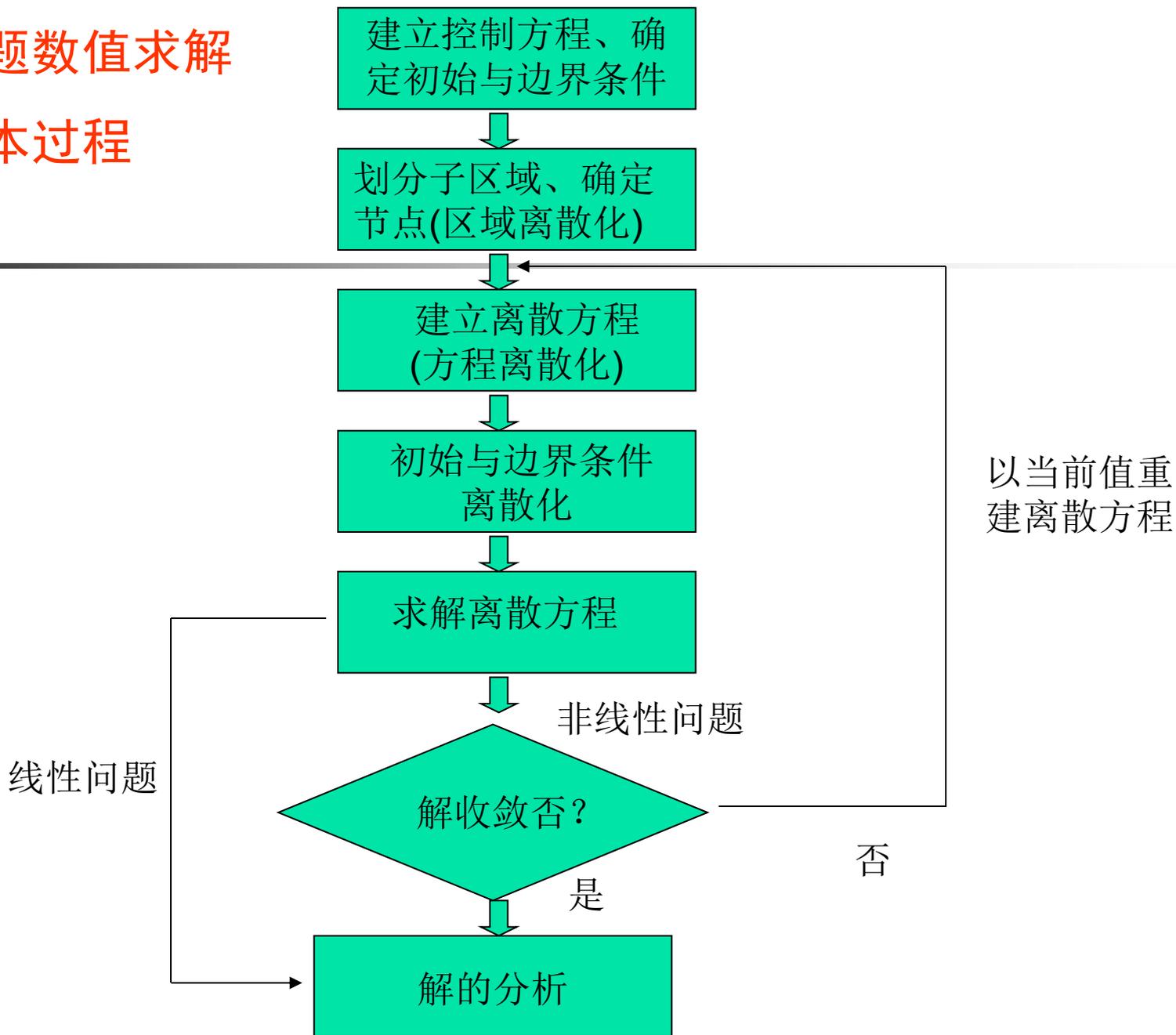


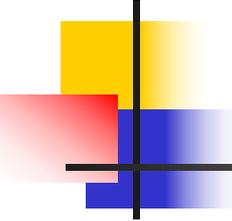
# 流动与换热设备（或系统）的稳态特性及动态性能数值模拟

- 由于许多工程设备结构的复杂性，常常需要对结构或者过程作合理的简化，如大型冷凝器中管束间流场的计算引入多空介质的概念来代替实际的管束
- 这类计算的主要目的在于获得对工程设计具有指导意义的结果，而不在于发展数值方法，因而常常采用已经过广泛考核比较成熟的算法、格式等
- 许多实际问题，不仅仅包括热量传递的三种方式，还常常伴随有化学反应，燃烧等

# 物理问题数值求解

## 基本过程

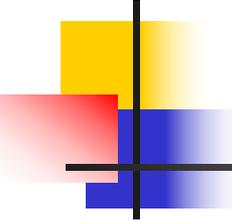




# 场模拟数值计算的主要环节

---

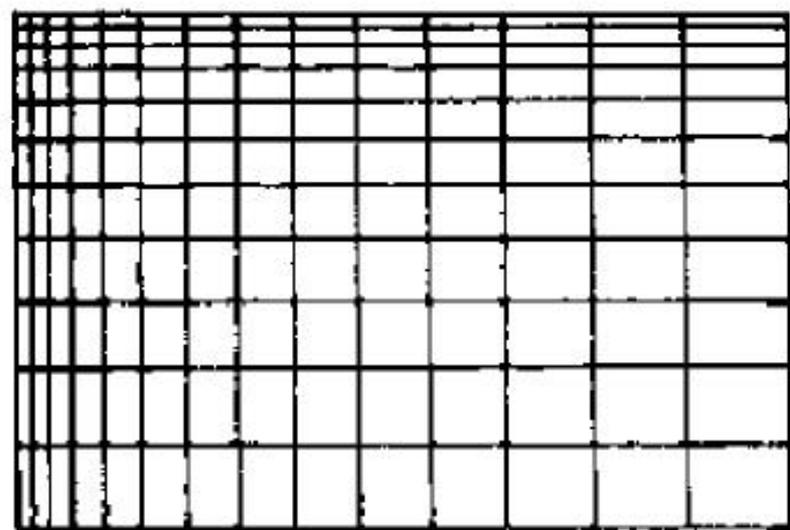
- 选择合适的**坐标系**，建立物理数学模型
- 划分网格
- 确定**方程离散化**的方法，选取对流项与扩散项的离散格式
- 对**边界条件**进行离散化处理
- **求解**代数方程组
- **解的分析**及数值计算不确定度的估计



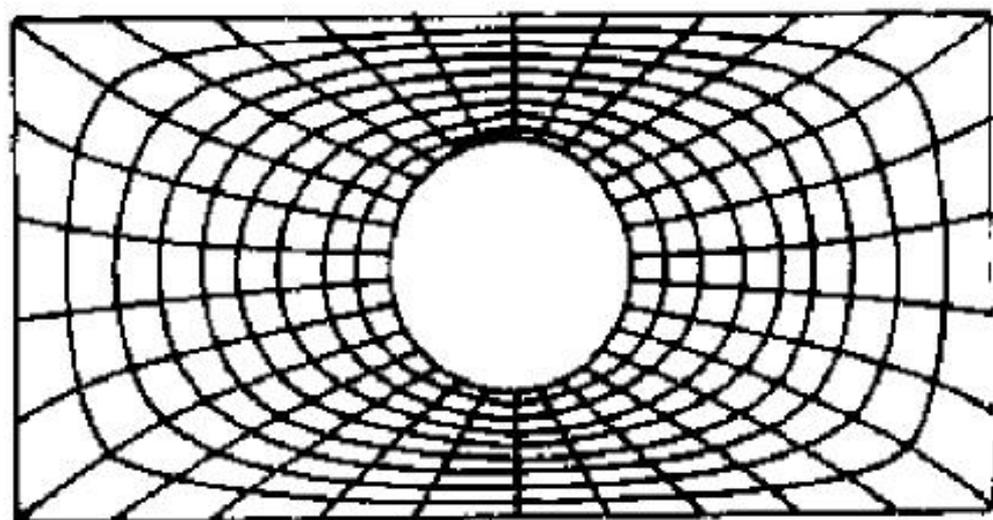
# 建立网格

---

- **结构化网格**：任意一个节点的位置可以通过一定的规则予以命名
- 块结构化网格
- 非结构化网格

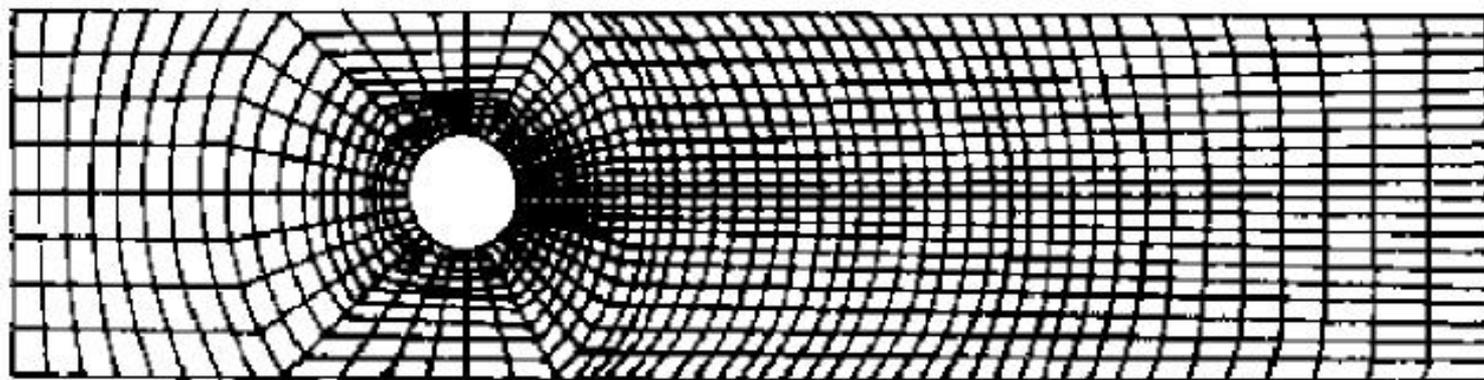


(a) 正交

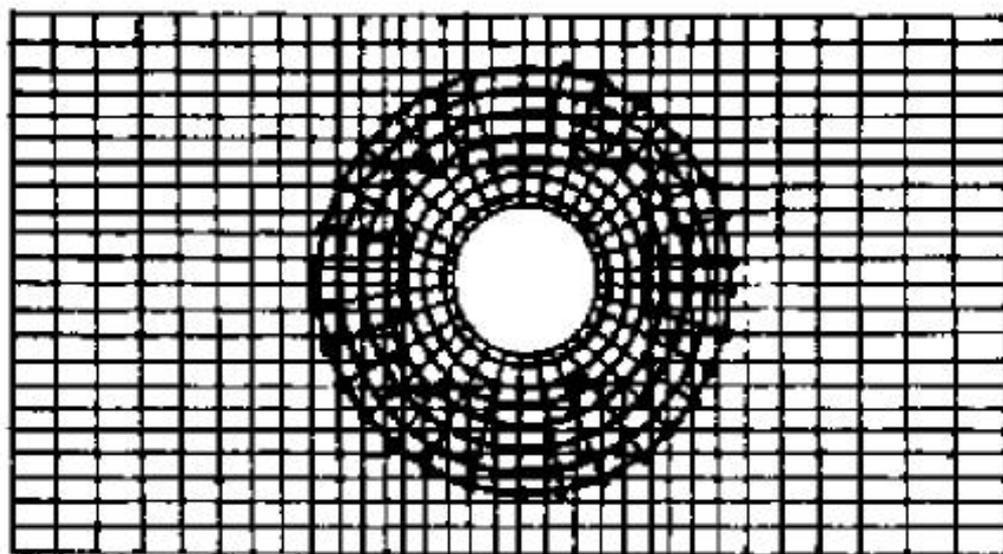


(b) 非正交

图 1-2 结构化网格



(a) 不重叠



(b) 部分重叠

图 1-3 块结构化网格

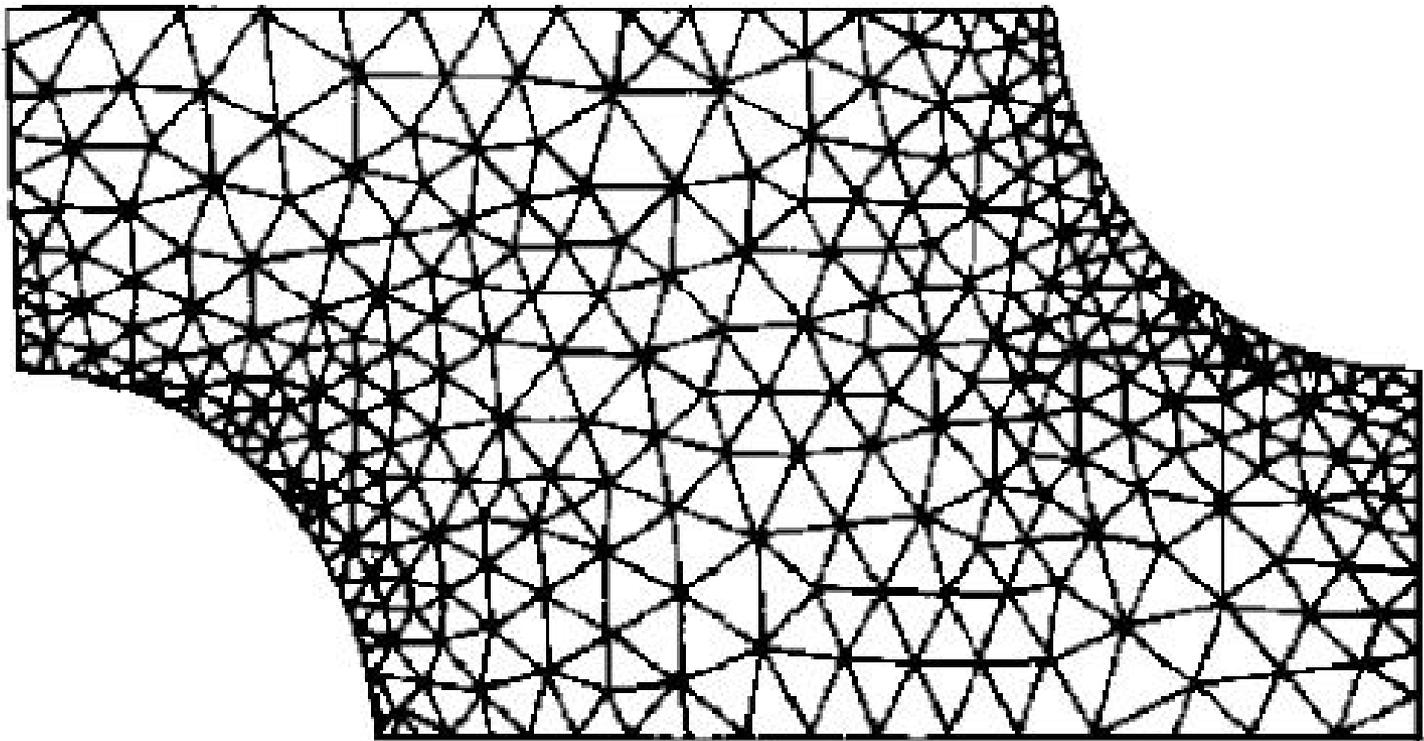
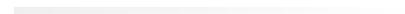
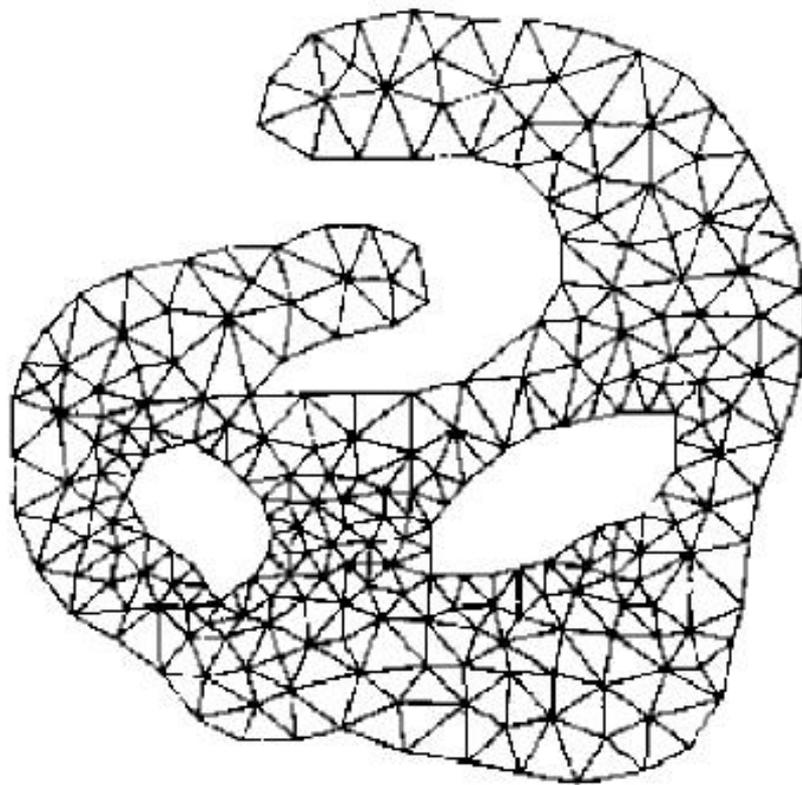
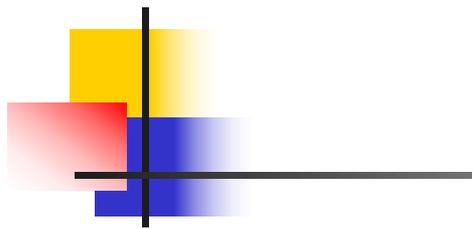
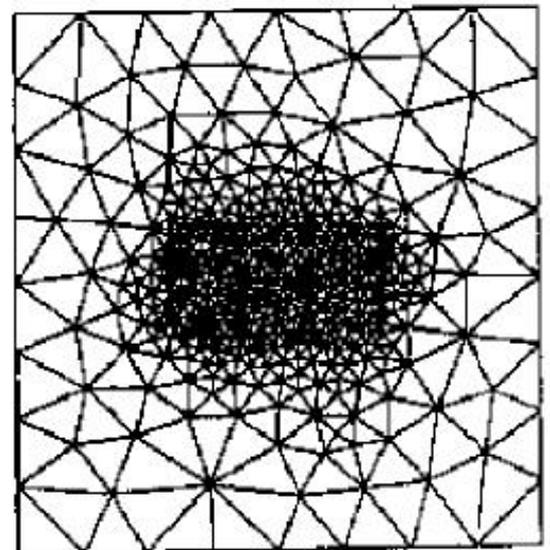
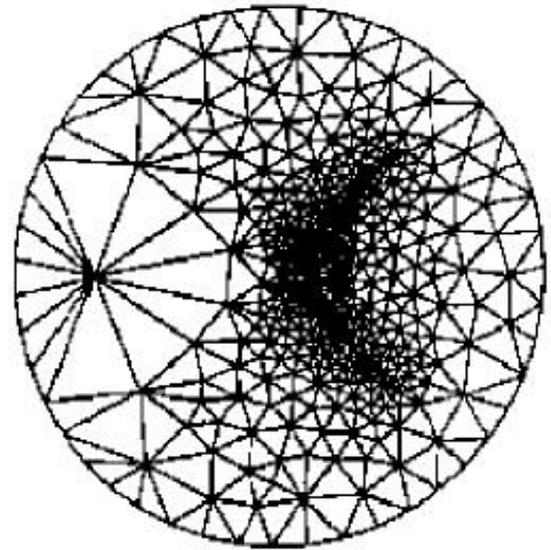
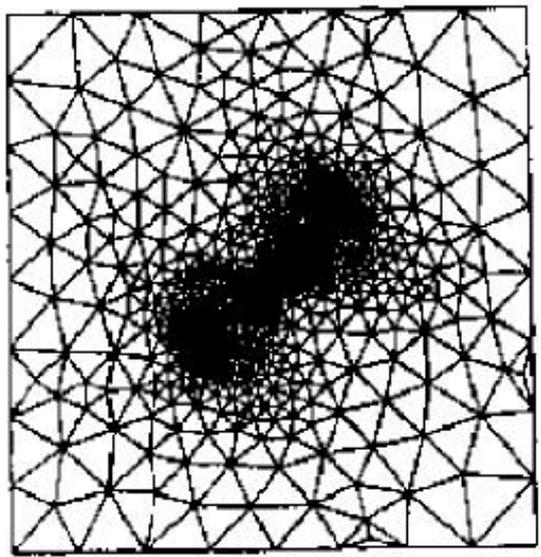
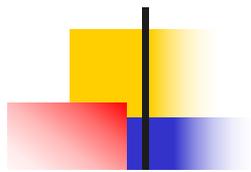


图 1-4 非结构化网格





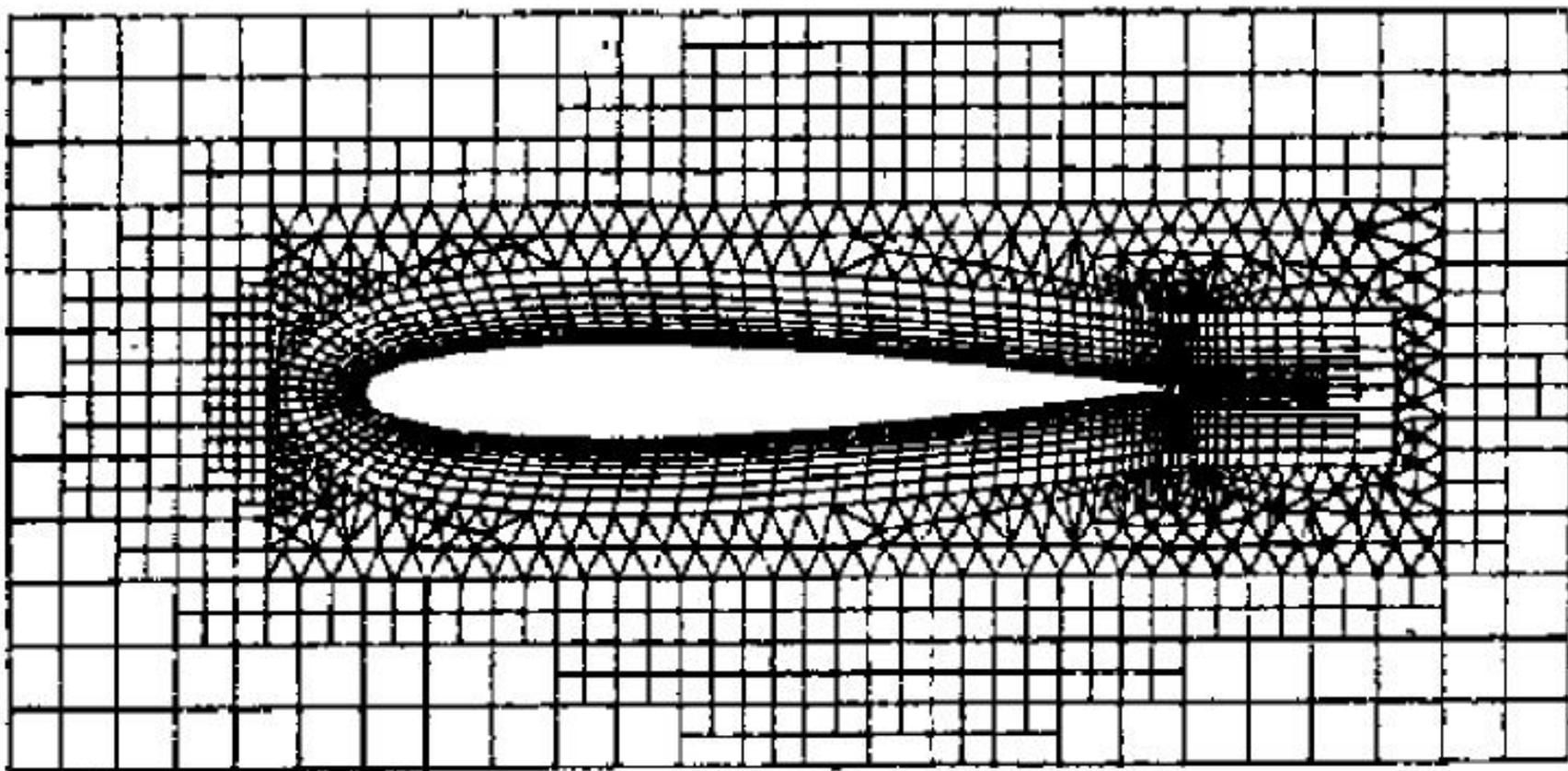
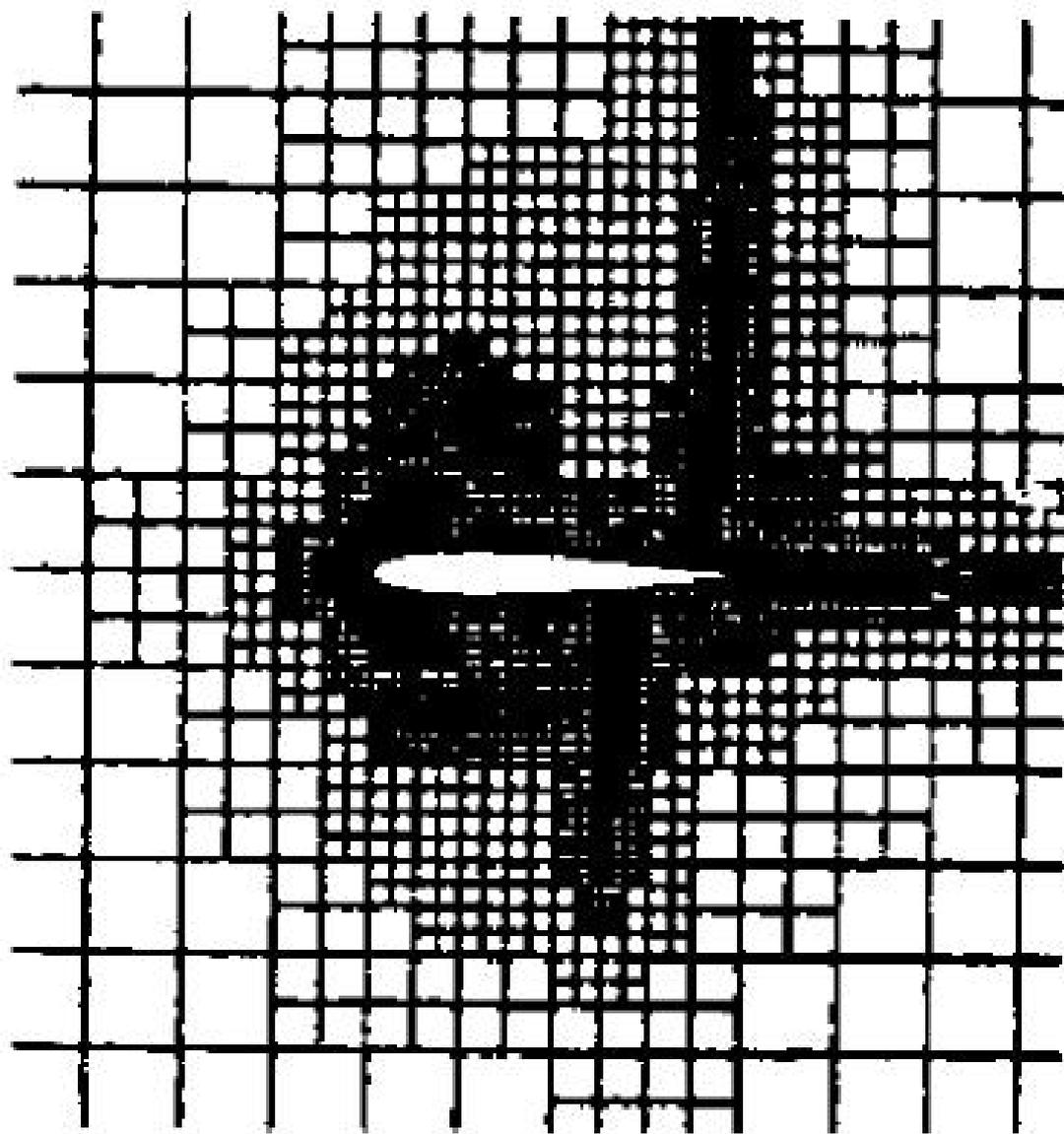
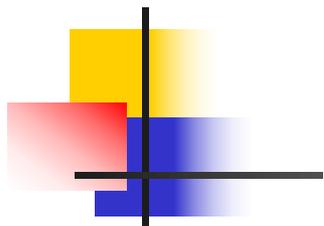
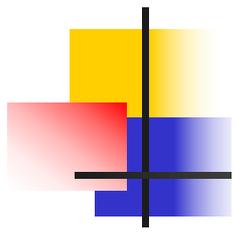
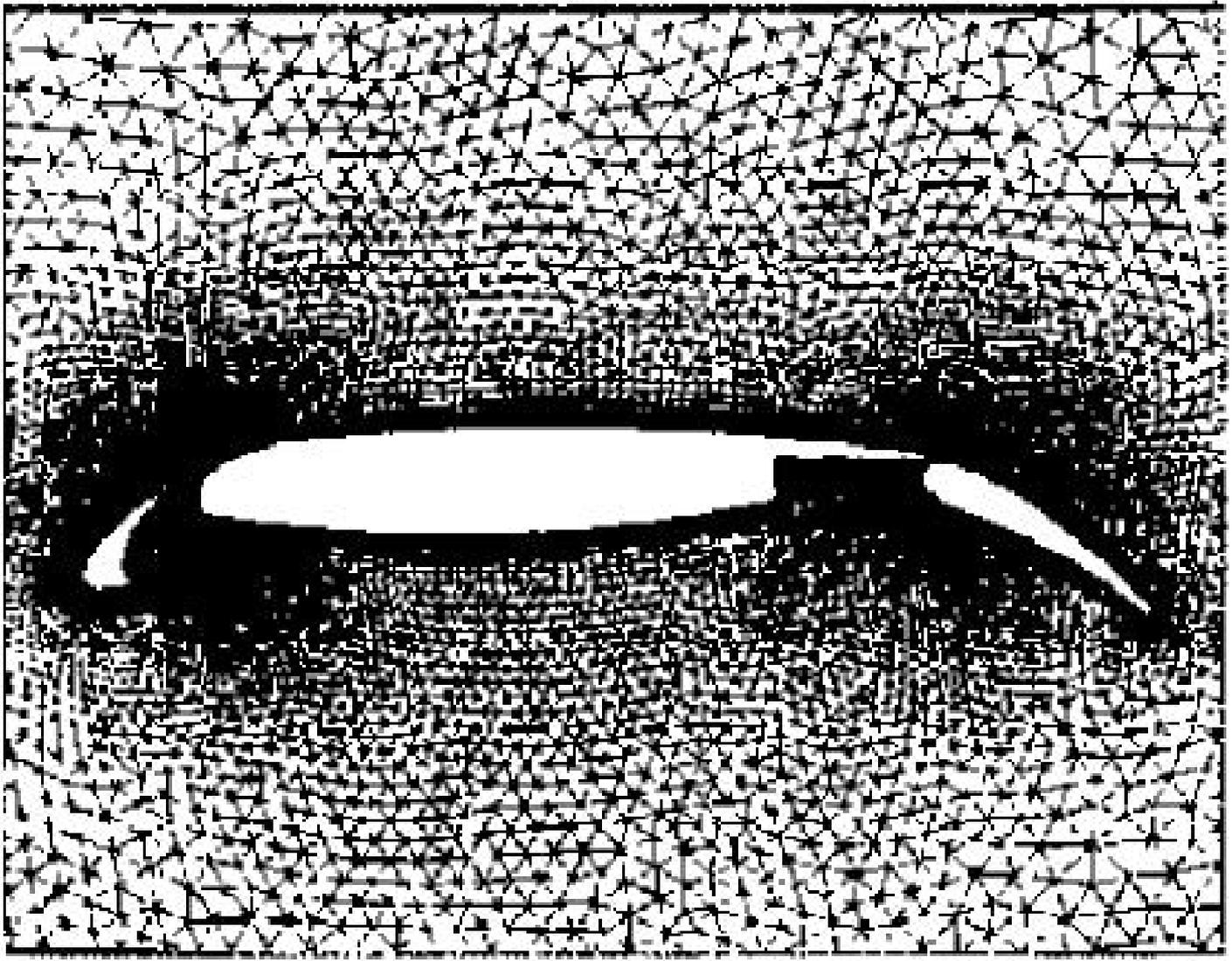


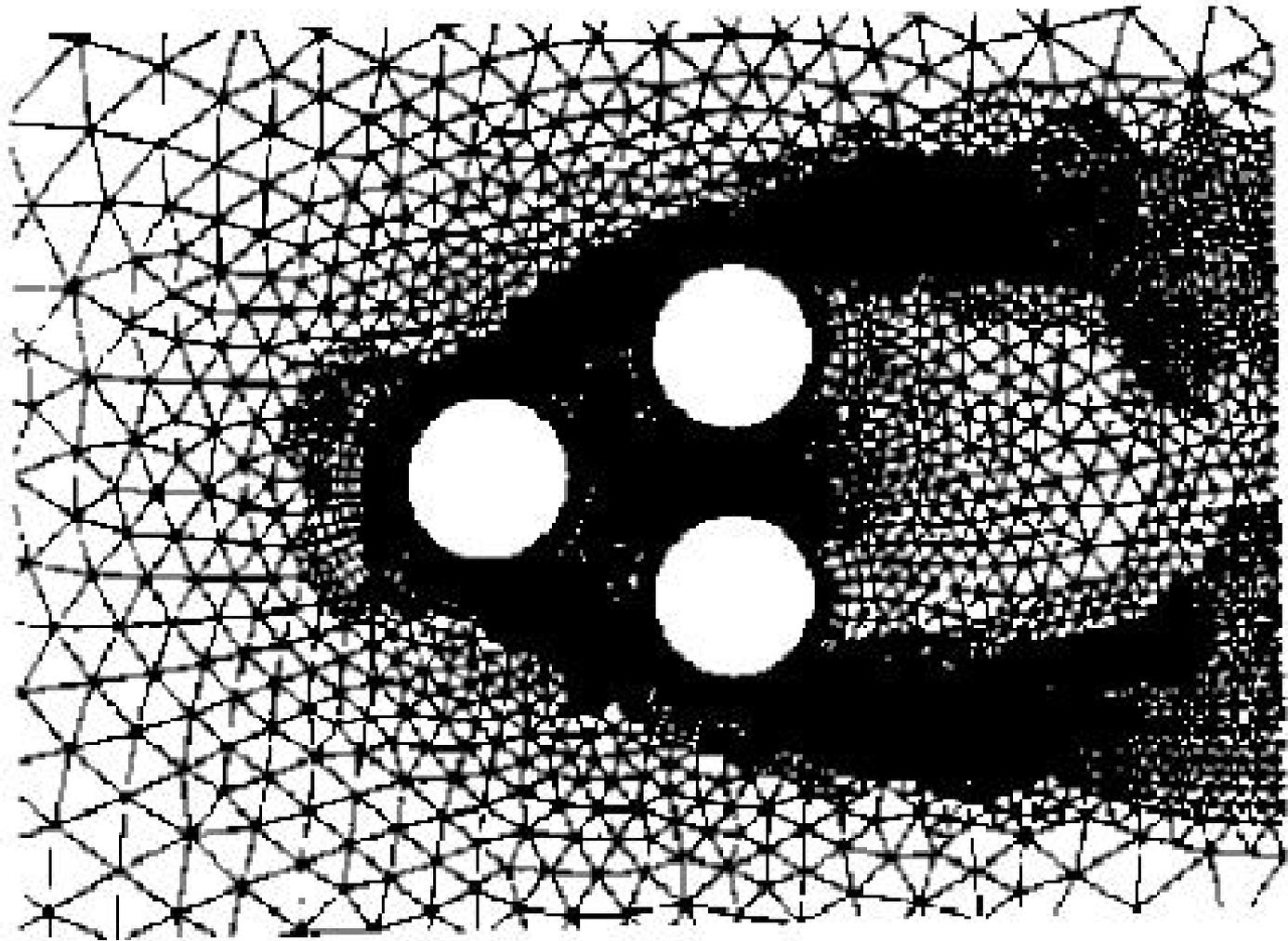
图 2 73 结构化与非结构化的混合网格

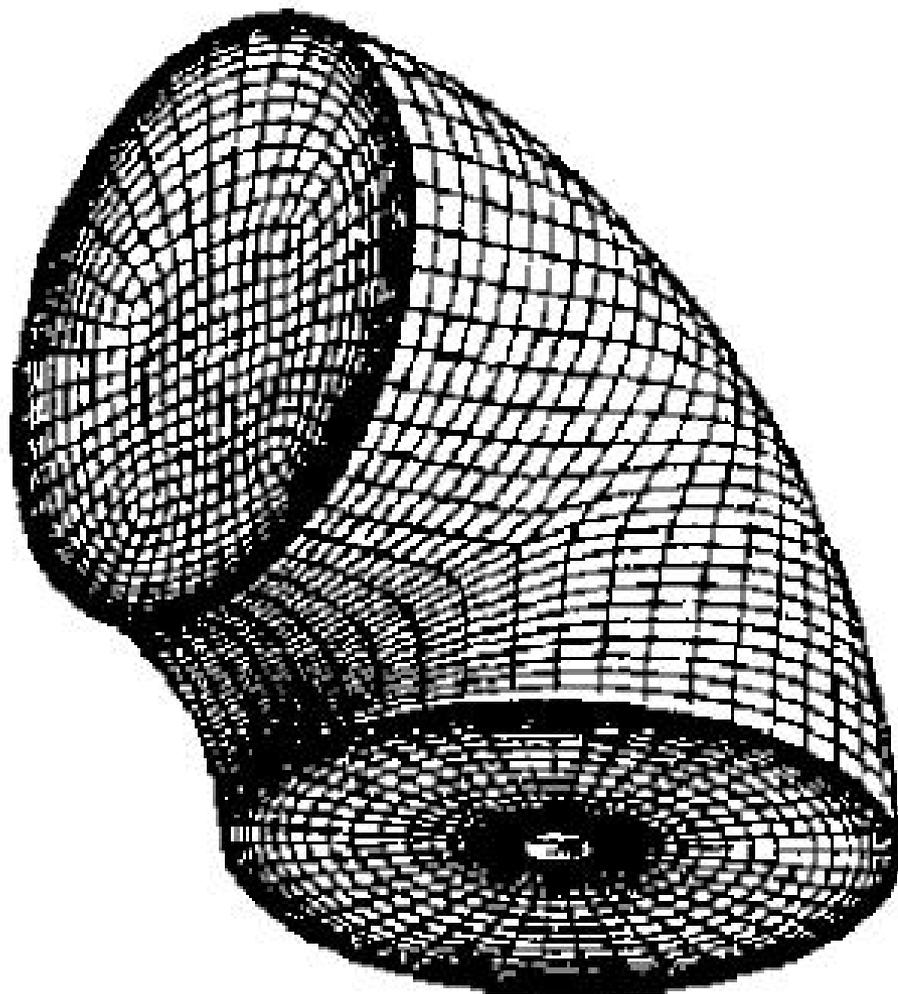
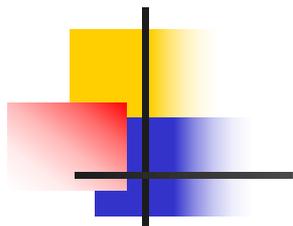
- 结构化与非结构化 **混合网格**



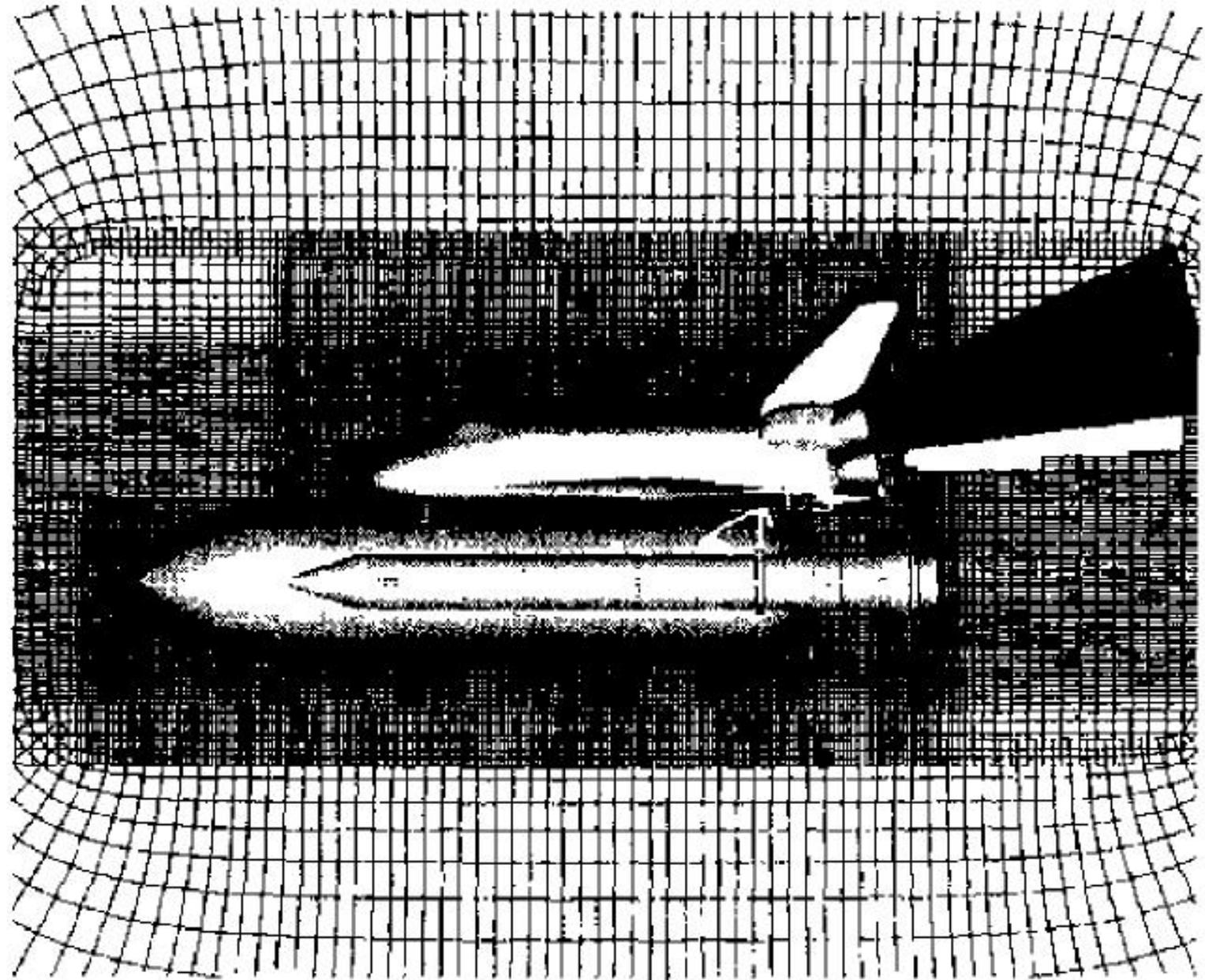
(a) 计算外掠机翼流场的网格







---



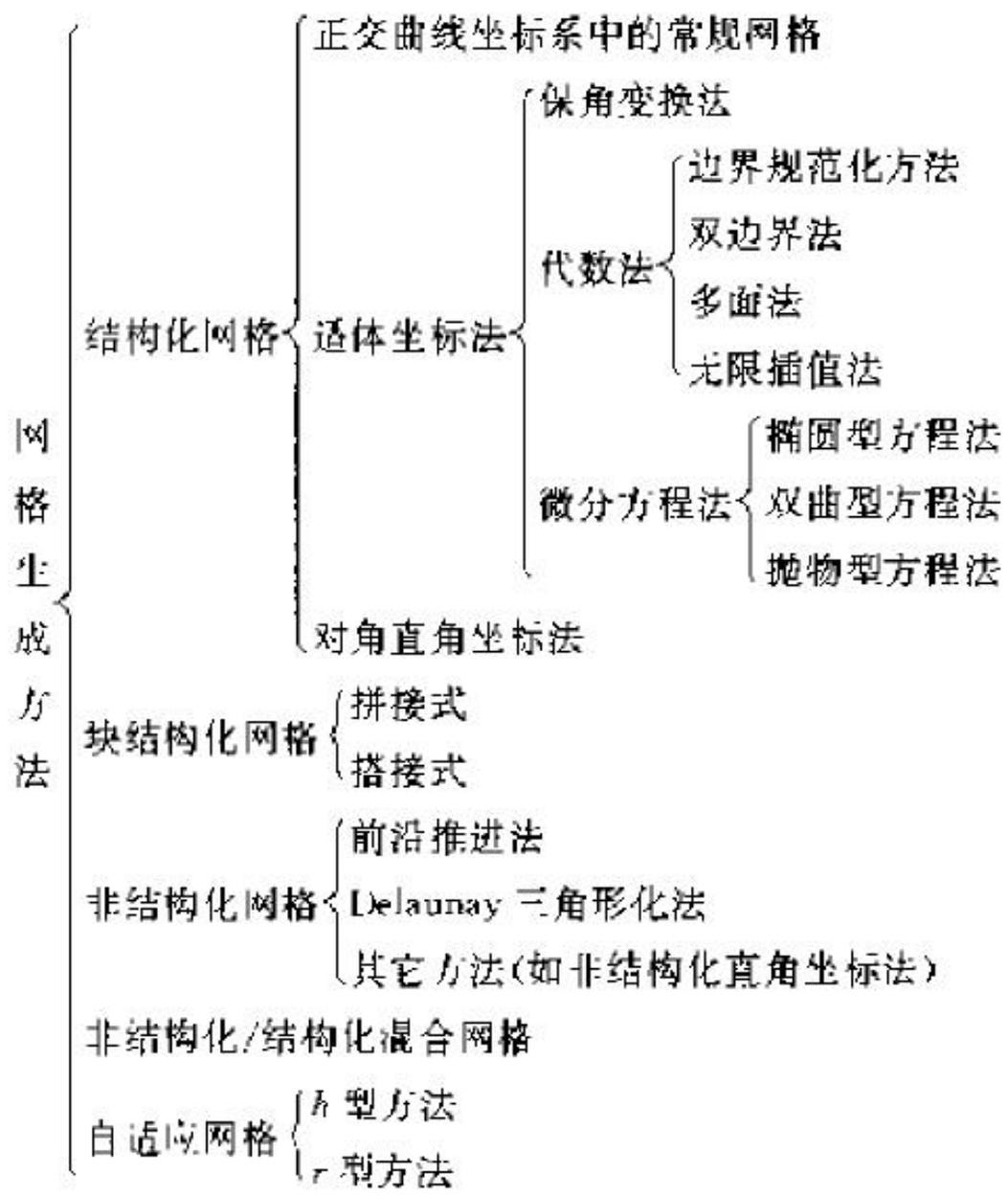
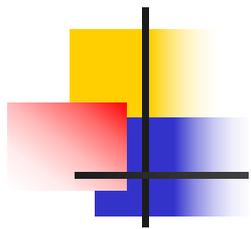
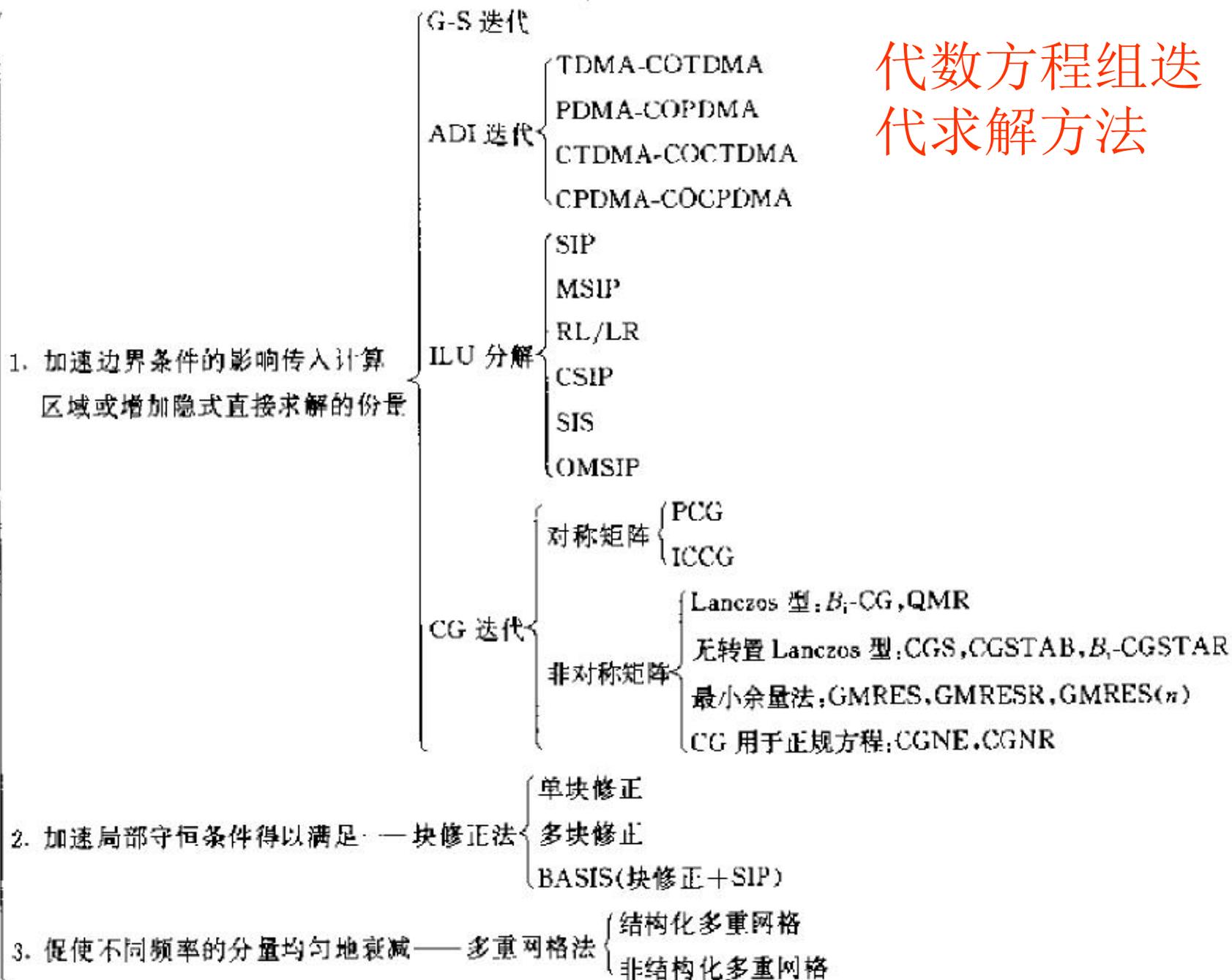


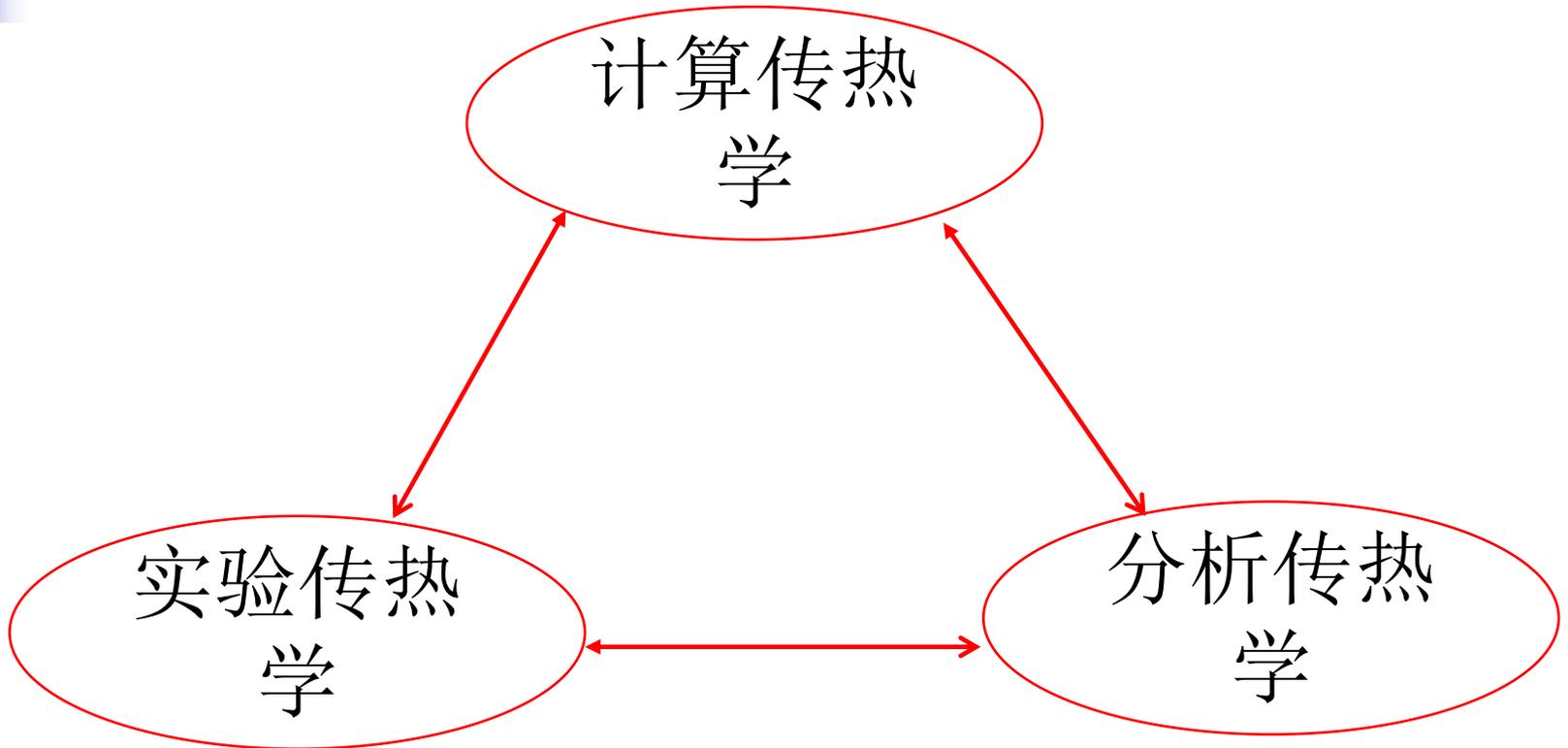
图 2 1 网格生成技术分类

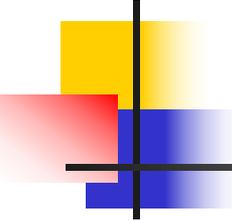
# 代数方程组迭代求解方法

加速代数方程迭代求解收敛的方法



# 计算传热学的作用与地位

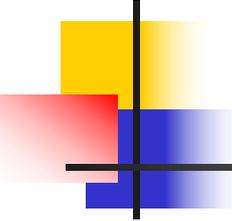




# 分析传热学

---

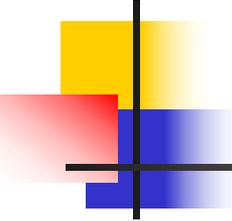
- 分析解具有普遍性，各种因素的影响清晰可见
- 分析解为检验数值计算的准确度提供了比较依据
- 分析解还可为发展新的数值方法提供基础



# 计算传热学

---

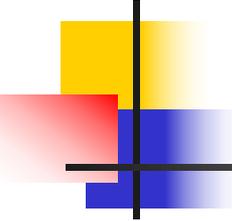
- 成本较低，能模拟较复杂或较理想的过程，拓宽实验研究的范围，没有测量误差和系统误差，不存在测试手段的干扰
- 曾有过先由数值模拟发现新现象而后由实验予以证实的例子



# 计算传热学与计算流体力学

---

- 两者既有联系又有区别：
- 对流换热的求解与流场的求解不可分割
- 研究的内容与侧重点有比较明显差别：  
例如：计算流体力学中理想流体的数值模拟以及激波的捕获是数值计算的重要内容，但这些内容在计算传热学中不那么重视



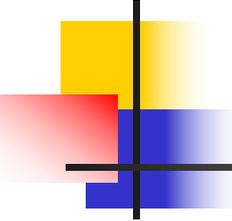
# 计算传热学的发展史

---

## ■ 萌芽初创时期(1965-1974)

- (1) 交错网格的提出：1965年美国科学家Harlow & Welch提出，促使了求解 NS 方程的原始变量法的发展
- (2) 对流项迎风差分格式
- (3) 世界上第一本计算流体及计算传热学的期刊-Journal of Computational Physics于1966年创刊
- (4) 1972年SIMPLE算法问世
- (5) 1974年美国学者Thompson, Thames 和 Mastin 提出了采用微分方程来生成**适体坐标**的方法

# 开始走向工业应用阶段 (1975-1984)



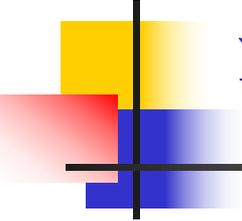
---

- (1) Numerical Heat Transfer创刊
- (2) PHOENICS软件问世
- (3) 对流项差分的QUICK格式
- (4) Patankar教授的名著 “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”出版
- (5) 同位网格方法

# 进一步兴旺发达的时期 (1985至今)

- 1. 前后处理软件的迅速发展
  - 前处理：生成计算网格的技术
  - 后处理：计算结果的绘图或可视化的手段
- 2. 巨型机的发展促使了并行算法、湍流直接数值模拟与大涡模拟的发展
- 3. 多个计算传热与流动问题的大型商业通用软件陆续投放市场。商用软件进入中国市场：我校火灾实验室首先买进了PHOENICS的使用权
- 4. 数值计算方法向更高的计算精度，更好的区域适应性及更强的健壮性的方向发展

# 几个值得注意的商用软件和开源软件



---

- Fluent, COMSOL
- OpenFoam

