



工程多物理场仿真数值方法及工程应用

张群 博士，总裁

英特工程仿真技术（大连）有限公司

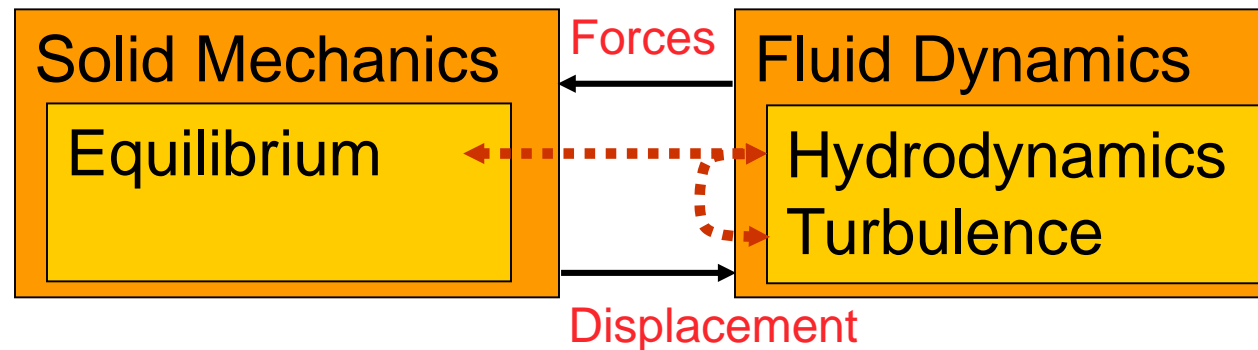
# 演讲内容

---

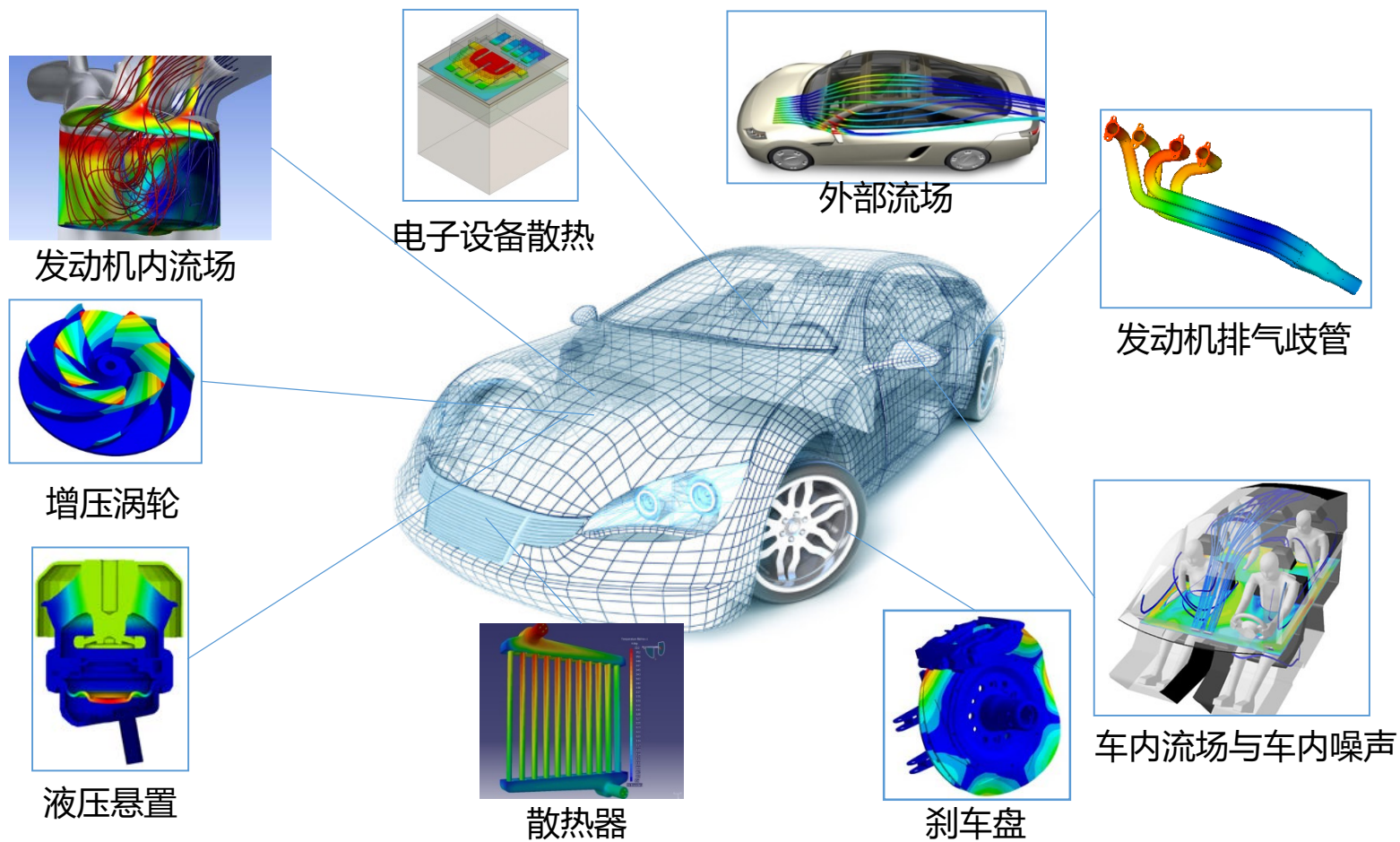
- 多场耦合现象分类
- 多场耦合方法
- INTESIM 耦合功能概述
- INTESIM 多场耦合工程应用案例

# 什么是多物理场仿真

- Coupled physics analysis is a combination of analysis from different engineering disciplines which interact to solve a global engineering problem
- When the input of one physics analysis depends on the results from another analysis, the analyses are coupled.



# 汽车工程中的多场分析

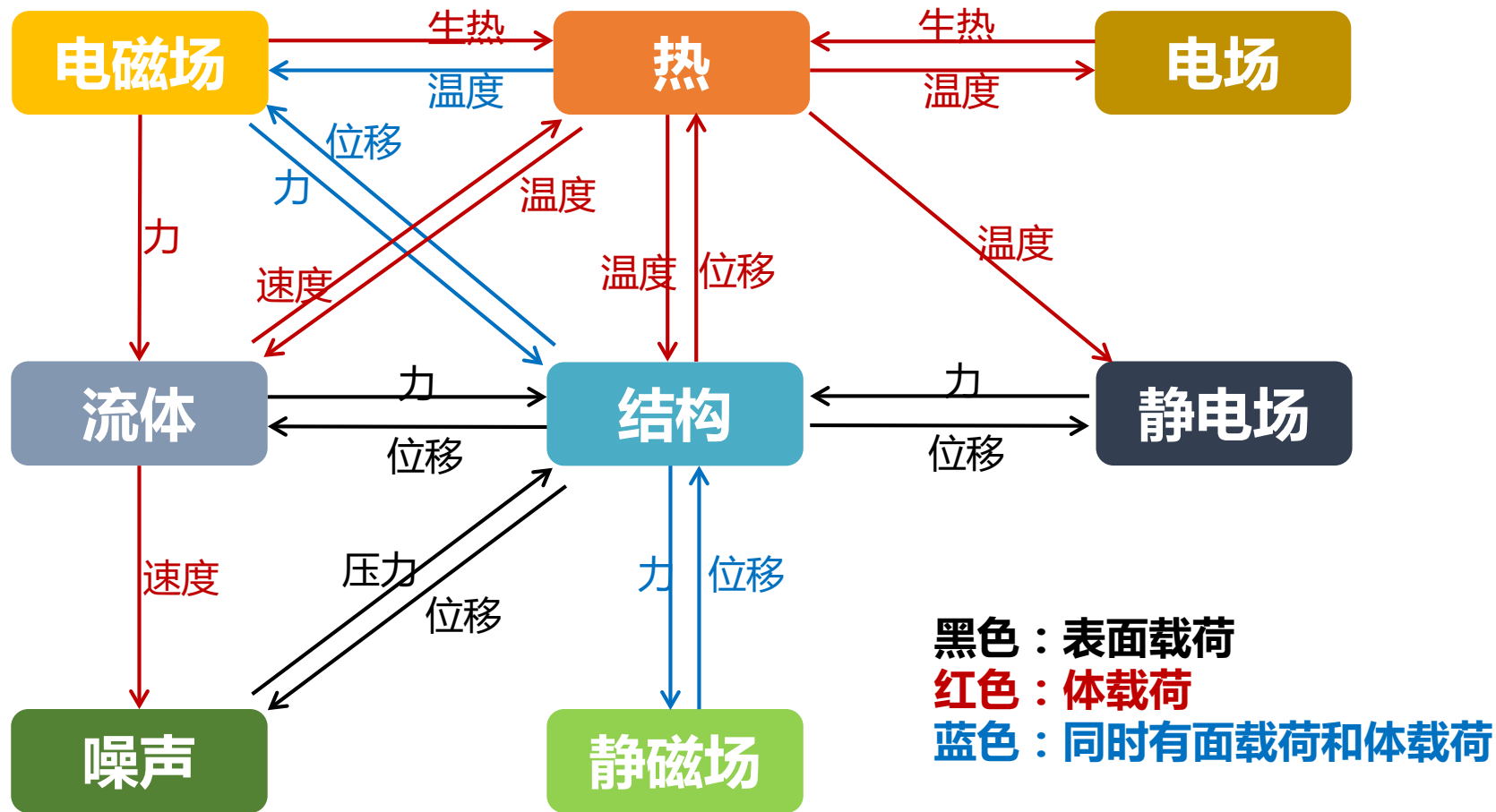


# 工程中常见的物理场

---

- 结构/固体（结构强度分析，碰撞安全等）
- 流体（气动外形设计）
- 热
- 电场/静电/磁场/电磁场
- 压电
- 噪声

# 弱耦合物理场载荷传递



# 耦合方法

---

- 工程上有两种处理耦合场问题的方法，强耦合和弱耦合
- 强耦合（直接求解）：直接求解界面方程，同时更新耦合系统的所有自由度
  - 单一代码
  - 多个代码（一个代码作为主要代码工作，不同代码直接需要传递矩阵和向量）
- 弱耦合（迭代求解）：每个物理场单独求解，界面条件通过物理场之间的载荷传递进行满足
  - 包含多个物理场场的单一代码
  - 多个代码通过耦合界面进行耦合

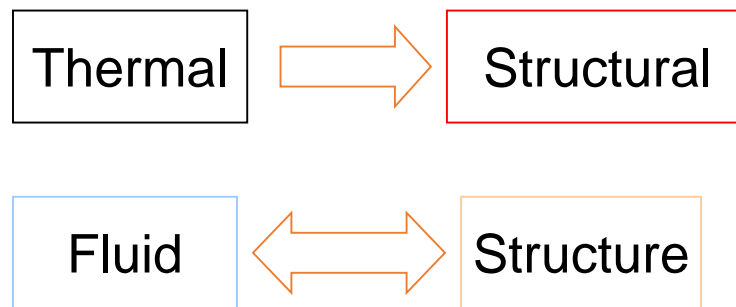
# 单向耦合与双向耦合

- 单向耦合

- 当某物理场分析A的输入条件依赖于另外一个物理场分析B，但是B的输入条件不依赖于A；
- 耦合成为一个单向的过程，在使用**弱耦合**方法时，没有必要在两种物理场之间进行迭代。

- 双向耦合

- 当某物理场分析A的输入条件依赖于另外一个物理场分析B，同时B的输入条件依赖于A；
- 在使用**弱耦合**方法求解时，需要在两种物理场之间迭代平衡





# 单向耦合

---

- 单向耦合
  - 稳态问题
    - 本质上不是耦合问题，可以用两个单独的物理场分析代替。
  - 瞬态问题
    - 只有在简便处理动态边界问题时，问题才是耦合的（在处理动态边界时只进行一次求解）
    - 其它情况下也不是耦合问题。

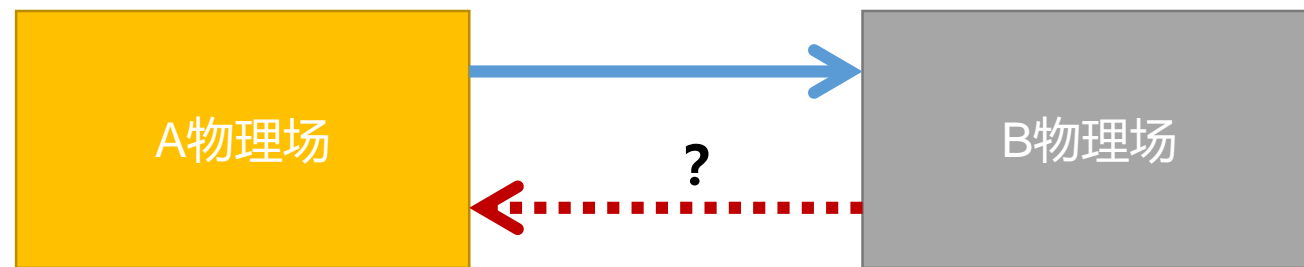
# 双向耦合

---

- 双向耦合
  - 强耦合问题
    - 高度非线性问题，物理场之间有很强的依赖性  
例如：包含结构屈曲的流固耦合分析问题
  - 弱耦合问题
    - 线性问题，物理场之间的依赖关系较弱  
例如：热结构耦合问题

## 采用双向耦合的必要性

- 单向耦合在耦合界面上只进行一次数据传递，并没有实现数据的双向传递和平衡迭代，不能保证耦合面上的连续性和能量平衡，因而并没有达到真正的稳态平衡。进行双向耦合分析是十分必要的。



没有反向数据传递，无法保证连续性和能量平衡

## 耦合类型：数学分类

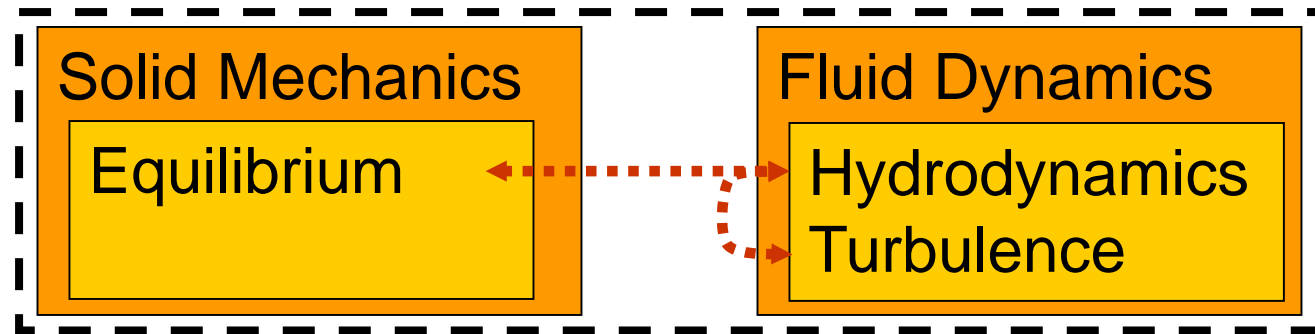
---

- 基本耦合问题 ( Essential Coupling )
  - e.g. 流固耦合 ( FSI ) 问题
- 源项/自然边界条件 ( Source Term/Natural Boundary ) 耦合
  - e.g. 热应力问题
- 本构关系耦合 ( Constitutive Law Coupling )
  - e.g. 在求解热应力问题时的温度相关材料
- 积分领域耦合 ( Integration Domain Coupling )
  - e.g. 流固耦合 ( FSI ) , 热-结构耦合
- 可变的生成项之间的耦合 ( Variable Production Term Coupling )
  - e.g. 热-流体耦合

# 强耦合方法

---

- 单一的，完全耦合的整体方程组
- 直接求解多场耦合方程
- 同时求解所有物理场



## 强耦合方法（直接耦合）

- 增量形式的耦合方程
- 同时求解耦合方程

$$\begin{bmatrix} \Lambda_{ii}^f & \Lambda_{ic}^f & \mathbf{0} \\ \Lambda_{ci}^f & \Lambda_{cc}^f + \Lambda_{cc}^s & \Lambda_{ci}^s \\ \mathbf{0} & \Lambda_{ic}^s & \Lambda_{ii}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \varphi_i^{*f} \\ \Delta \varphi_c^{*fs} \\ \Delta \varphi_i^{*s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R}_i^f \\ \mathbf{R}_c^{fs} \\ \mathbf{R}_i^s \end{Bmatrix}$$

$\Lambda$ : 耦合系统的等效质量矩阵

$\Delta \varphi$ : 各个变化矢量的增量

$\mathbf{R}$ : 耦合系统的残差向量

# 强耦合方法

---

- 优势：
  - 通过一步求解复杂的多物理场耦合分析问题
  - 针对强耦合问题具有较好的收敛性
- 不足：
  - 针对新的耦合问题，需要完全重新编写求解器
  - 由于不同物理区域存在的“刚性”不同，矩阵系统往往非常病态。
  - 对于大规模问题，在求解线性方程时需要花费较高的计算成本。
  - 针对不同的物理模型的灵活性较小（网格离散，时间积分格式等等）

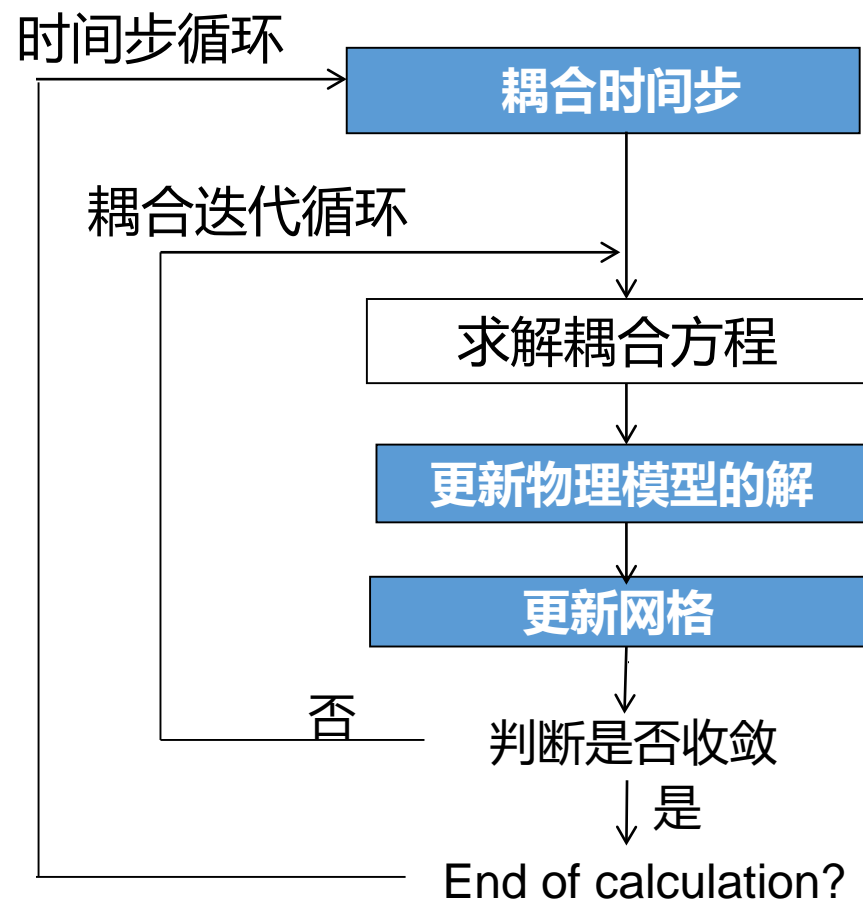
# 进行强耦合的几种方法

---

- 耦合单元（单元自由度和矩阵级别的强耦合）
- 直接界面自由度耦合（物理场之间的界面拥有匹配的网格）
- 采用约束方程的形式进行界面耦合（物理场之间的界面网格可以是不匹配的）
- 拉格朗日乘子法
- 罚函数方法

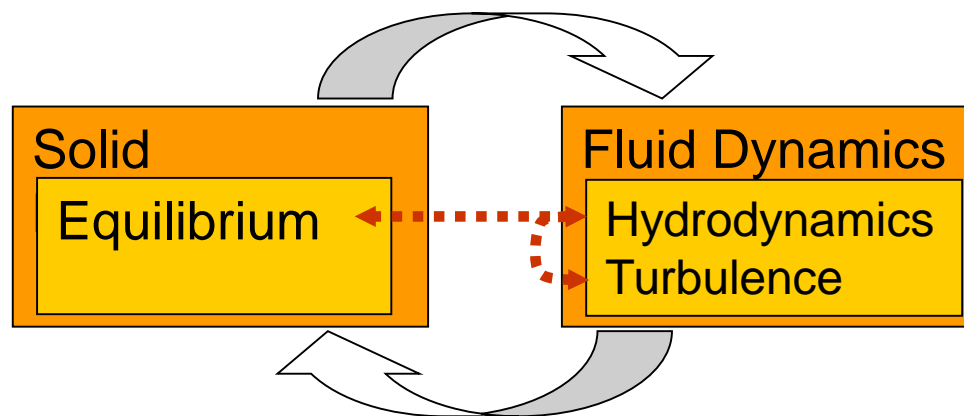


# 强耦合方法流程示意图



## 弱耦合

- 不同的物理场独立组成各自的方程组，独立进行迭代求解
- 物理场之间采用载荷传递的形式进行耦合
- 物理场之间既可以依次求解，也可以并行求解
- 弱耦合可以充分利用各个物理场独立的经过优化的求解方法，上述方法中，有一些本身也是耦合的。



# 弱耦合方法

---

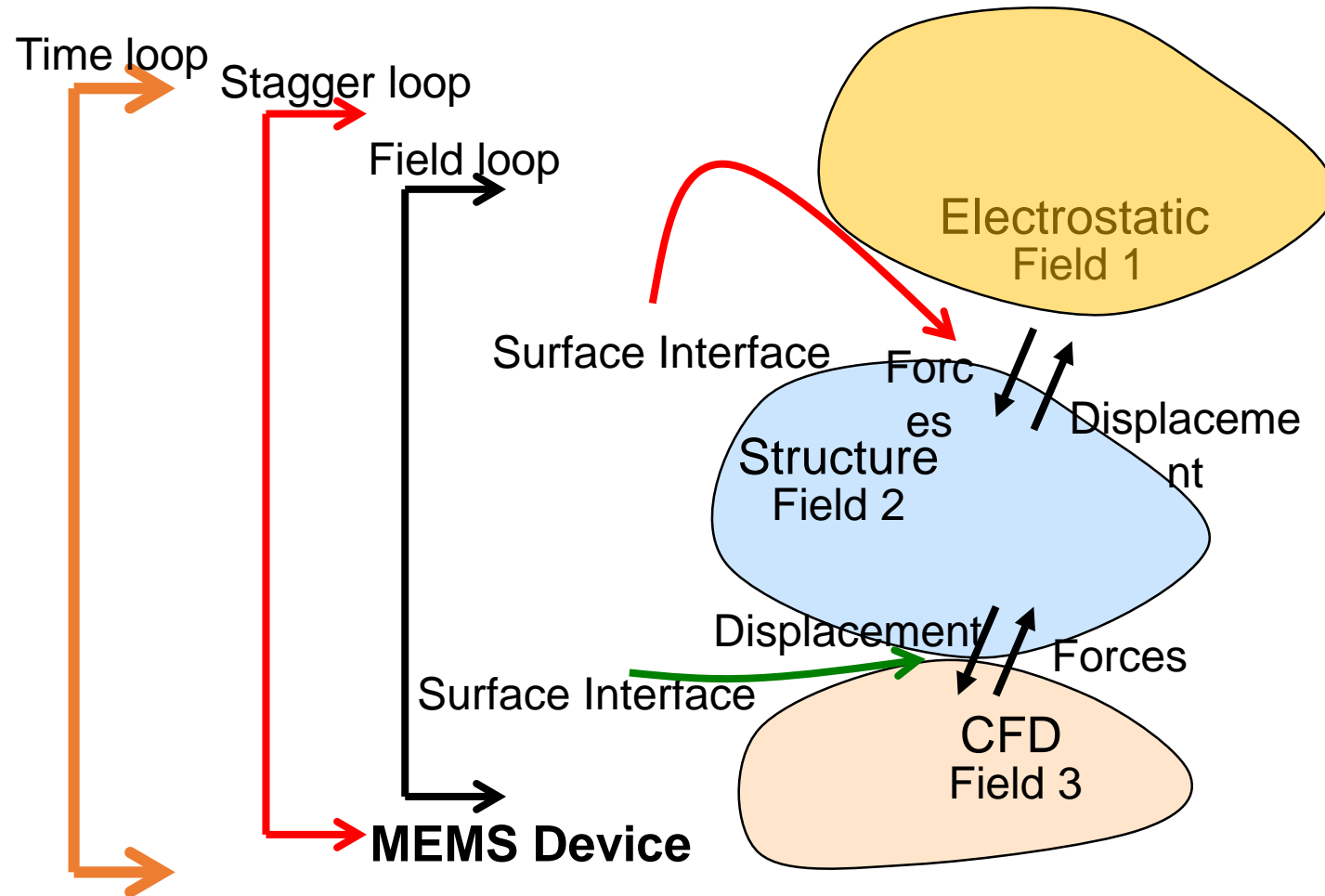
- 优势：
  - 不需要对物理场求解器进行重新编码
  - 能够充分利用每个求解器的主要特点
  - 不同分析类型间的非匹配网格界面
  - 针对弱耦合问题，求解更加经济，效率更高
  - 可以跨程序之间进行耦合
- 不足：
  - 求解耦合的载荷向量时需要的松弛技术
  - 对于某些类别的强耦合问题收敛缓慢，甚至完全不收敛

## 进行弱耦合的几种方法

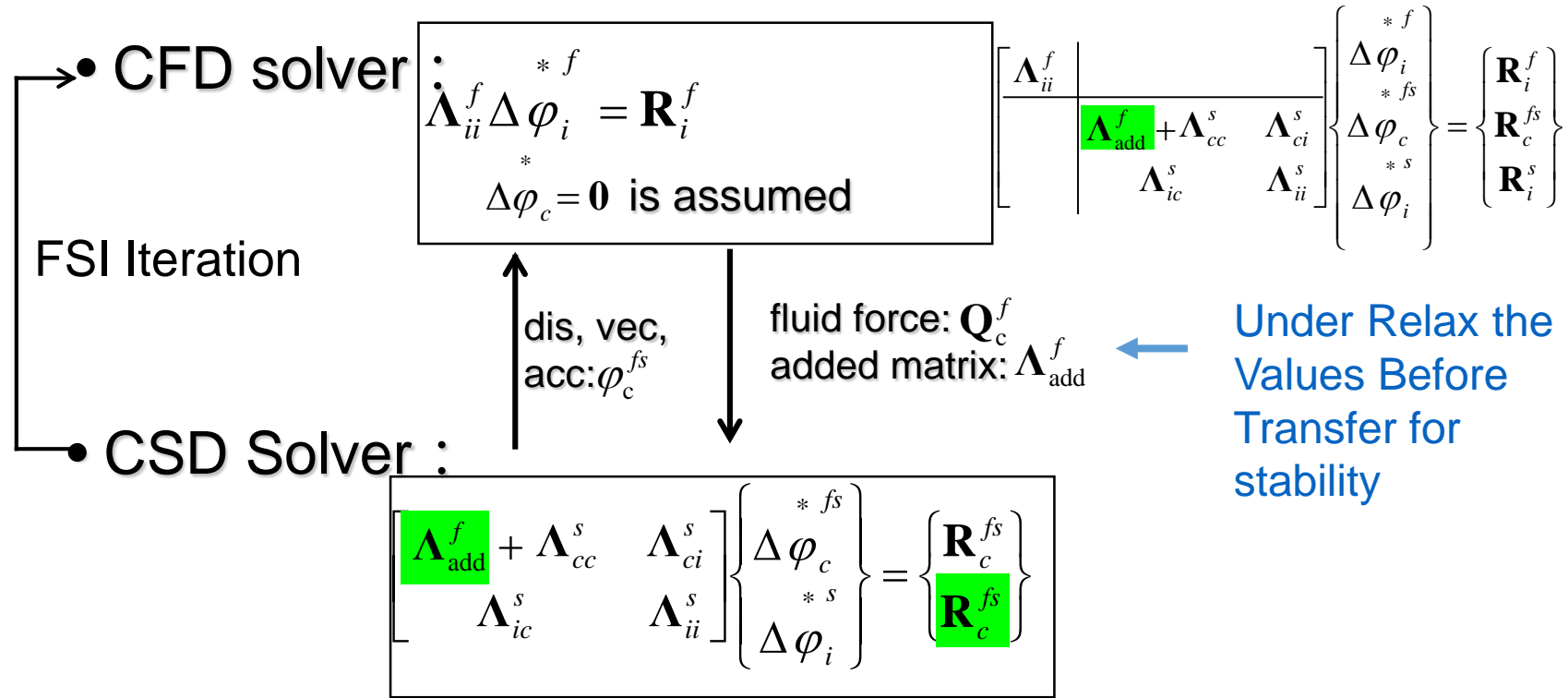
---

- 基于数据文件的数据传递（主要用于单向耦合和跨平台的双向耦合）
- 单一代码的弱耦合（Single Code Weak Coupling）
- 通过求解器间耦合交互界面实现求解器间耦合

# Single Solver Weak Coupling



# Weak Coupling solve structure with interface



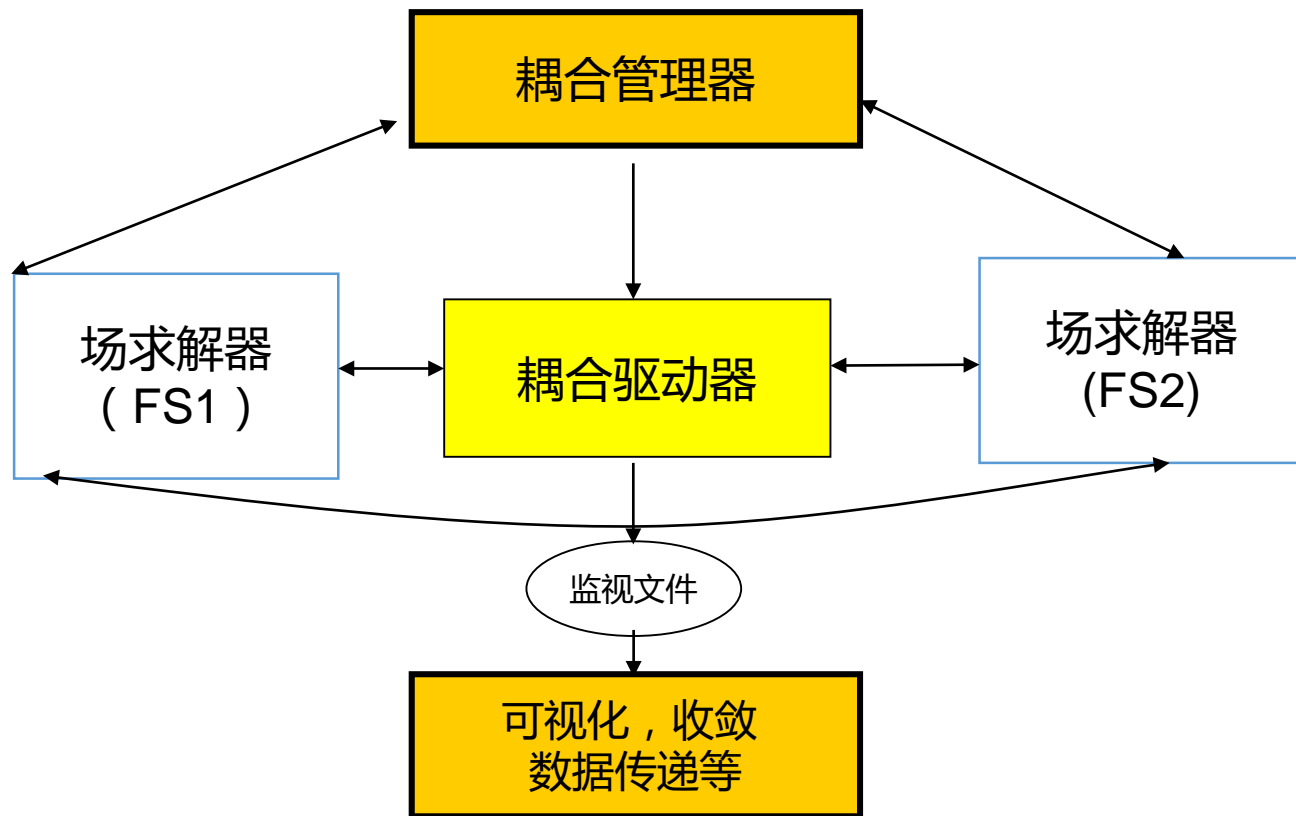
$$\Lambda_{add}^f = ?$$

# 求解器间耦合控制器

---

- 通用的耦合控制模块，负责执行所有的耦合控制以及数据传输控制，最大限度的减少针对长求解器的修改
- 允许场求解器间多个代码直接相互传递信息
- 支持面载荷和体载荷，不同场求解器间的一般数据/参数传递
- 由耦合驱动程序提供耦合仿真进程控制
- 先进的收敛控制；松弛算法；以及其它的耦合方法来处理强耦合问题
- 场求解器灵活性：允许根据需要以不同的方式运行场求解器（计算仿真类型，机器类型，并行算法，时间和空间的离散化方法等）

# 求解器间耦合





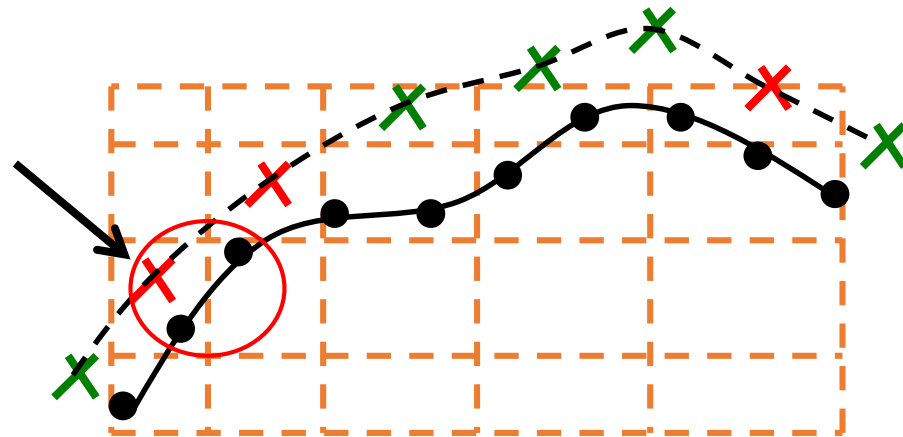
## 弱耦合的关键点

---

- 数据映射与插值算法
- 扩大弱耦合计算适用范围的方法：更好的时间步控制算法，更好的非线性迭代方法，更好的载荷松弛算法等。
- 耦合代码之间的通信技术

# 映射与插值方案

- 不匹配网格之间的数据交换
- Global Conservative
- Profile preserving
- 处理不完美匹配的几何和非重叠区域



## 使弱耦合变“强”的方法

---

- 正确的载荷传递方向 ( Right Load transfer direction )
- 子循环和非线性迭代算法
- 界面载荷松弛算法
- 物理场求解加速算法 ( Aitken算法 )
- 计算固体力学方面的新引进矩阵 ( 质量和粘度 )
- 计算流体力学方面的人工压缩方法
- 降阶的方法etc.

# ALE方法中的网格移动和重划分技术

---

- 通过网格变形移动，避免计算过程中出现网格失真的情况
  - 基于弹性方程、扩散方程或者拉普拉斯方程求解网格变形
  - 自适应网格刚度
  - 对于多周期问题的与时间无关的网格变形
- 自动网格重划分功能
  - 自动网格重剖分工具
  - 映射与插值技术
- 单元生死技术
  - 接触问题、挤压流问题
- 滑移网格

# 耦合问题的并行算法

---

- 强耦合
  - 并行分布式内存稀疏求解器求解病态的耦合矩阵；对于大规模问题有内存限制
- 弱耦合
  - 针对不同物理场求解器的并行计算技术
  - Communication overhead
  - Load balances across different physics/solvers

## 商业多物理场仿真的主要趋势

---

- 通过第三方耦合接口实现求解器间耦合
- 自身单一程序解决多物理场仿真问题，例如INTESIM，ADINA程序，拥有强耦合模块，但是物理模型较少，灵活性较差
- 软件中所有的物理模型采用统一的界面
- 集成CAD/CAE/PDM与优化设计，拥有多物理场仿真能力的设计平台



# INTESIM® 英特仿真

