



基于ALE方法的脉冲磁体不可逆电感变化计算

蒋帆、孙衢骏

华中科技大学 电气学院

COMSOL
CONFERENCE

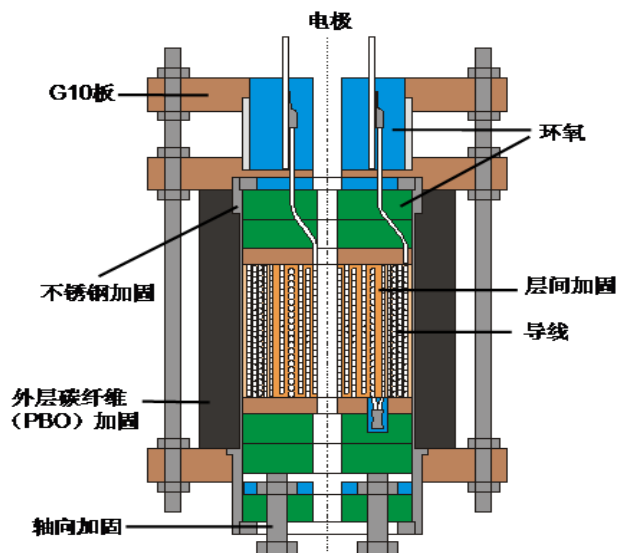
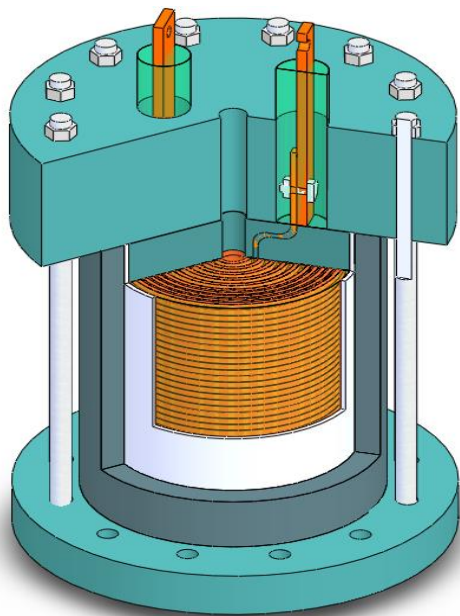
2015 北京

Excerpt from the Proceedings of the 2015 COMSOL Conference in Beijing

一、课题背景



脉冲磁体：线绕螺线管结构



导线缠绕



纤维缠绕



设计原则：

- 1) 保证磁场峰值时磁体内的应力小于材料抗拉强度，防止材料损坏；
- 2) 磁体放电前置于77K液氮中预冷却，脉冲结束时磁体内最高温度低于400K；

(1) 磁体仿真

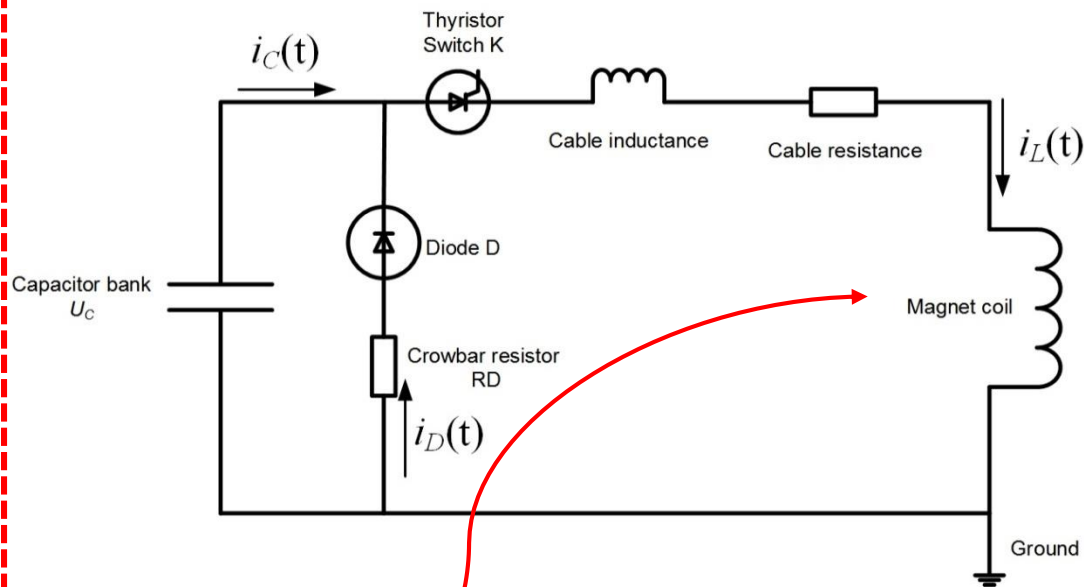


磁体仿真分析包括：

- 电路分析、电磁场分析、热传导分析以及结构力学分析

$$\begin{cases} Ri_L(t) + L \frac{di_L(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt = U_0 \\ U_C = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt \\ i_L(t) = i_D(t) + i_C(t) \\ \begin{cases} i_D(t) = 0 & U_C \geq 0 \\ i_D(t) = \frac{U_C}{R_D} & U_C < 0 \end{cases} \end{cases}$$

电路方程



需考虑其与电路方程的耦合

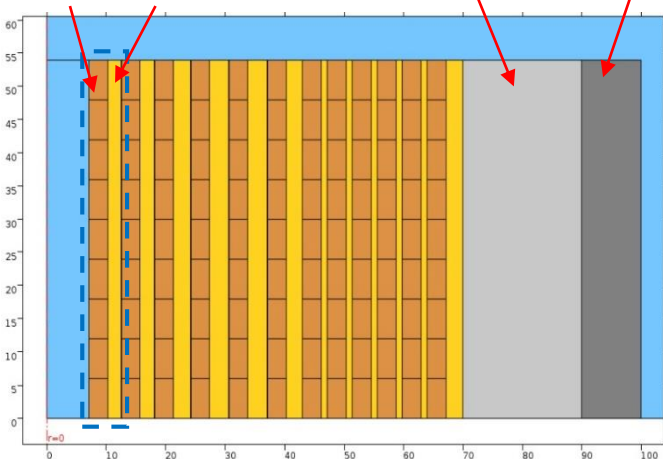
- 瞬态分析中，磁体线圈电感和电阻值为变化值

(2) 单元层间分离

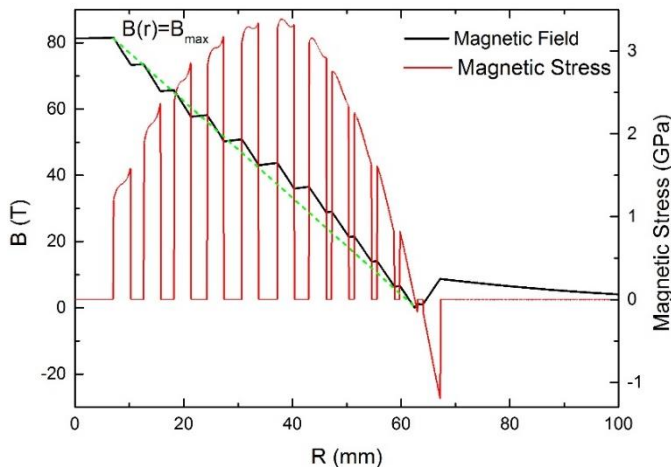


单元：导体层CuNb+加固层Zylon

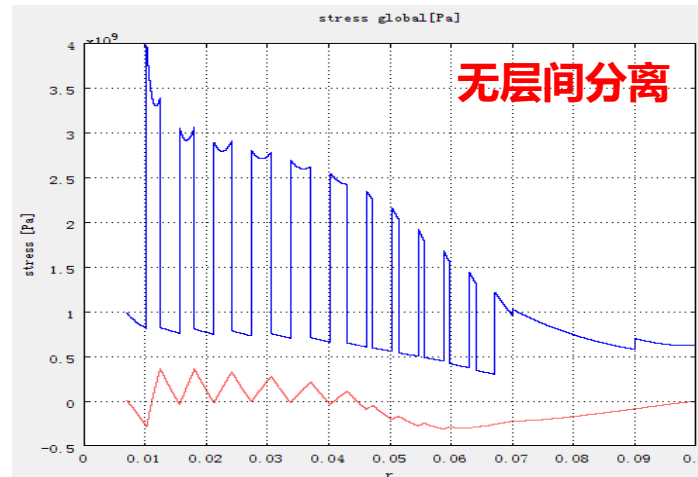
CuNb Zylon AISI 304 Carbon



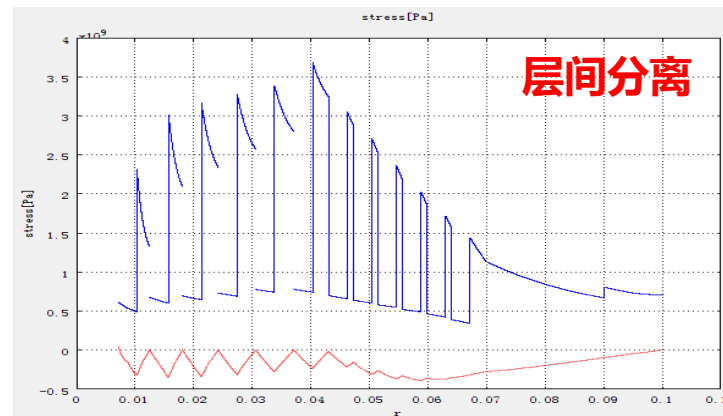
环向磁应力： $f_h(r) = B(r) * j * R$



内层单元之间有相互分离趋势



径向拉应力传递到最内层绕组



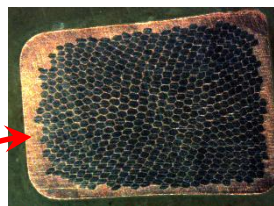
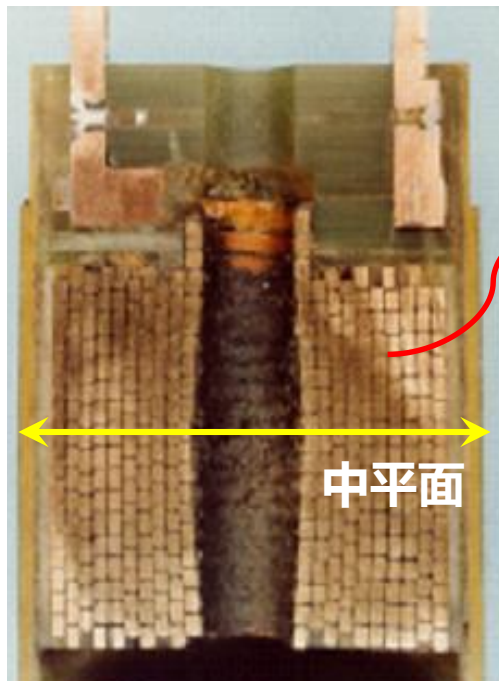
在结构力学分析中引入“接触对”；

允许单元之间自由分离，使得应力分布均匀

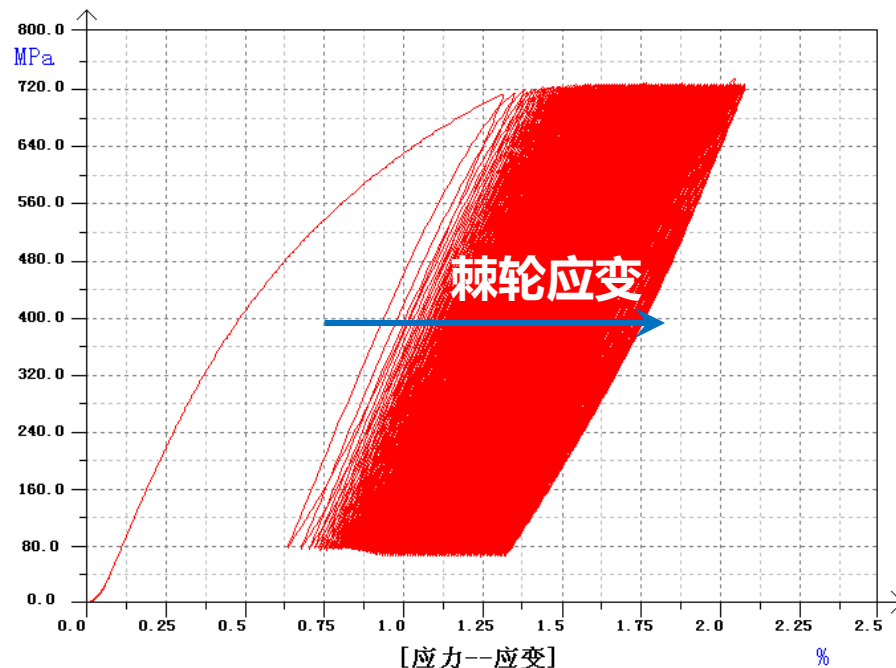
(3) 不可逆电感变化



磁体长期服役，反复经历强电磁力加载



CuNb金属纳米复合材料



单调拉伸循环加卸载曲线

多次放电后，内部结构变形图

不可逆电感变化是磁体内部导体的残余变形的宏观体现

- 1) 强电磁力加载，导体的塑性变形
- 2) 重复加载，塑性应变的累积



不可逆电感变化仿真

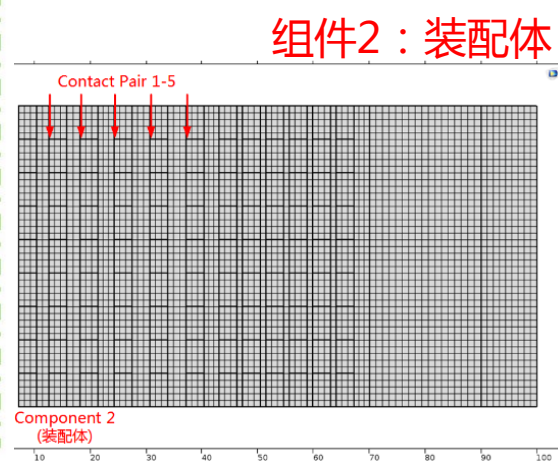
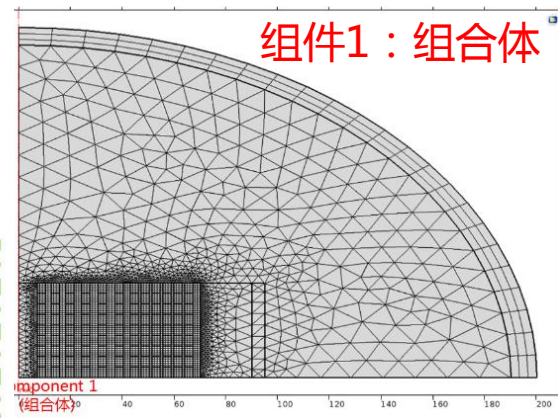
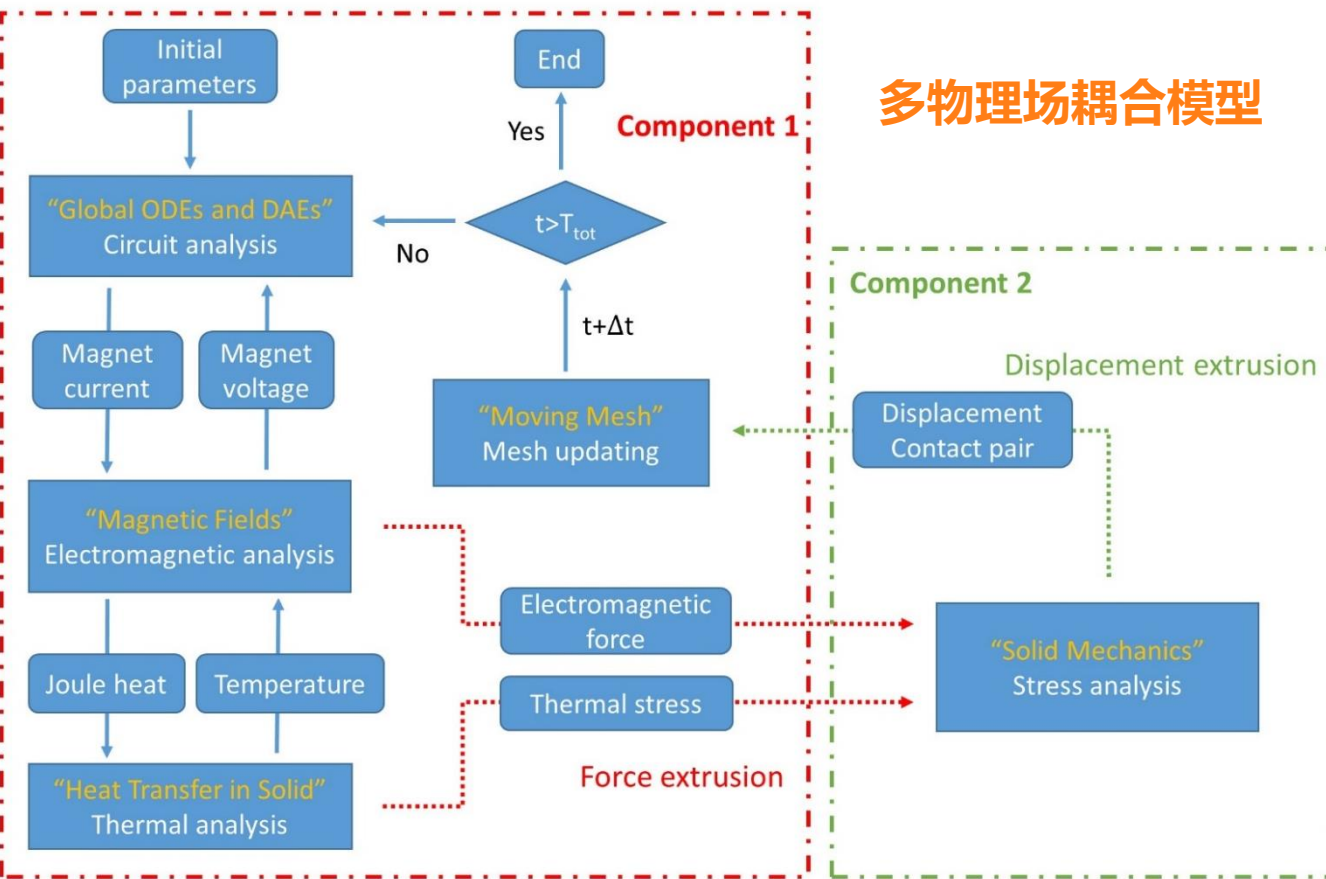


磁体寿命预测

二、仿真模型



多物理场耦合模型



Flowchart of the implemented algorithm

- 载荷和变形的拉伸耦合
- 接触对，罚函数法求解

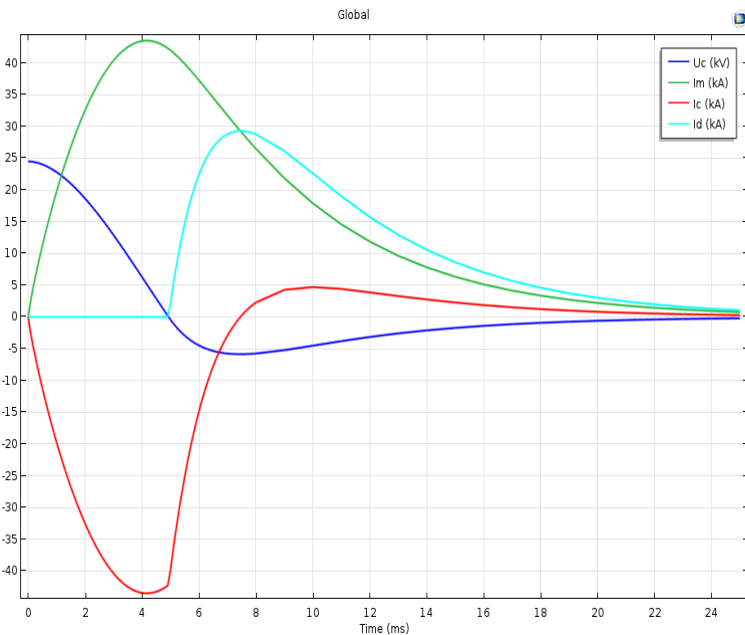
移动网格计算结构变形导致的电感变化；

能量法：
$$L = 2 * W_m / I_c^2$$

三、仿真结果

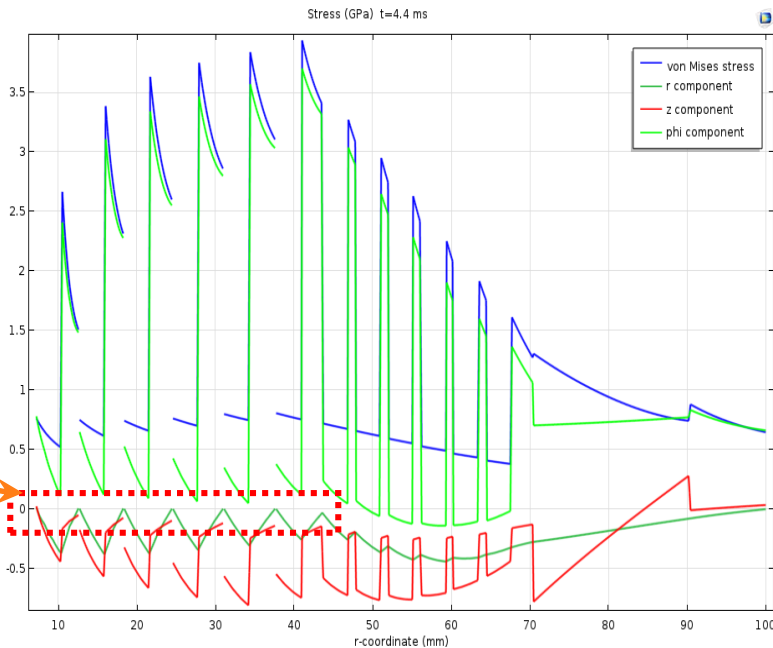


瞬态仿真计算



磁体电流/电压的波形图

无拉应力



峰值时刻的中平面应力分布图

- Irreversible inductance-moving-24.5kV.mph (root)
- Global Definitions
- Parameters
- Materials
- Component 1 (comp1)
 - Definitions
 - Geometry 1
 - Materials
 - Global ODEs and DAEs (ge)
 - Capacitor Voltage
 - Magnet Current
 - Current
 - Magnetic Fields (mf)
 - Heat Transfer in Solids (ht)
 - Moving Mesh (ale)
 - Multiphysics

Label: Magnet Current

Global Equations

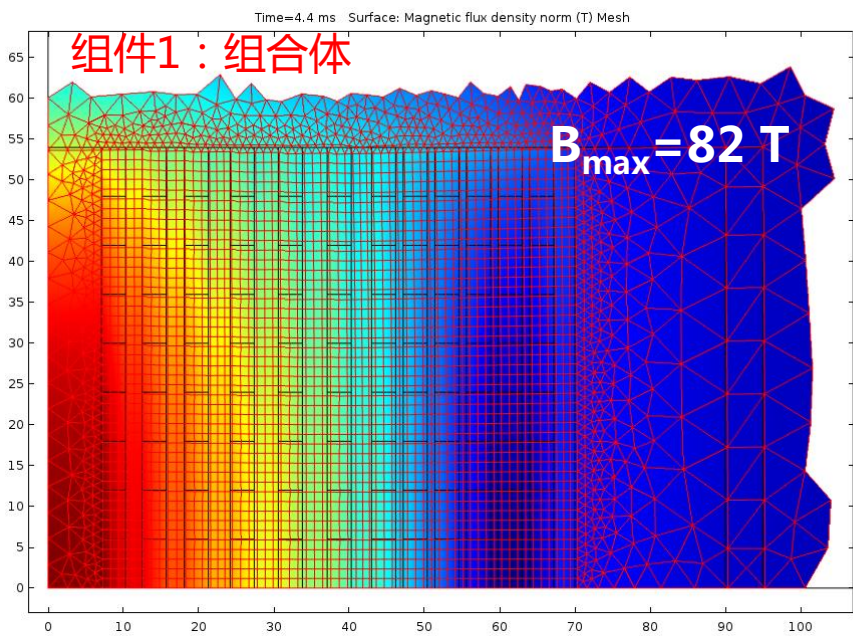
$$f(u, u_t, t) = 0, u(t_0) = u_0, u_t(t_0) = u_{t_0}$$

Name	f(u, u_t, t) (V)	Initial valu	Initial valu	Description
Im	$2 * mf.Vcoil_1 + Le * Im + Re * Im - Uc$	0	0	

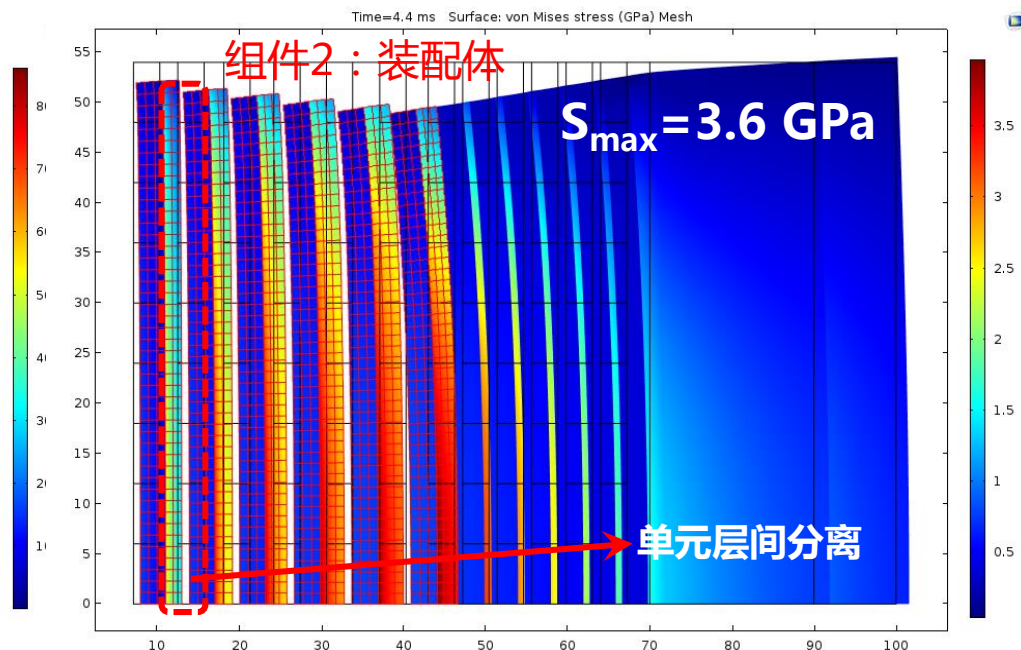
mf.Vcoil

- “单匝线圈域”自动考虑了涡流效应的影响；
- 线圈组域内置的线圈电压，能方便地与电路方程耦合；

(2) 网格变形



峰值时刻的磁场分布图及网格变形



峰值时刻的磁体结构和网格变形图 (变形因子: 5)

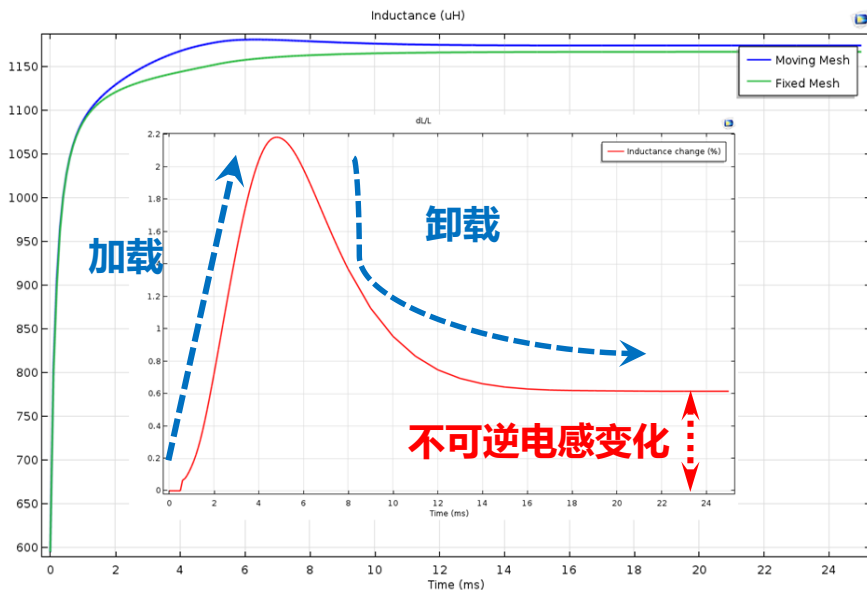
多组件建模：

- 电路方程、磁场、温度场、结构场以及移动网格的耦合分析模型；
- 接触对的引入，简化了几何建模流程；

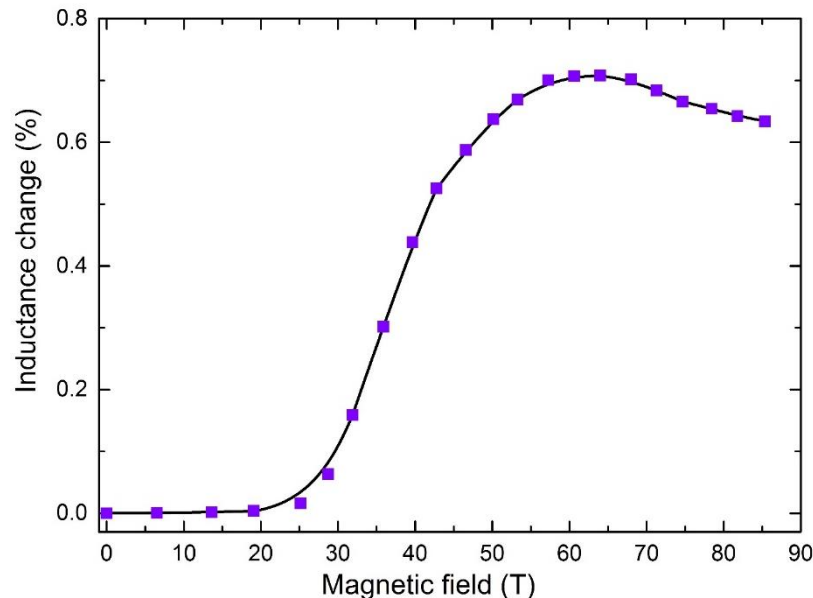
(3) 不可逆电感变化



ALE移动网格计算结构变形导致的电感变化：



磁体的电感随时间的变化图



不同磁场强度下的不可逆电感变化百分比

不同磁场强度下的不可逆电感变化的三个阶段：

- 1) 10 T-20 T，导体材料处于弹性阶段；
- 2) 20 T-65 T，导体材料进入塑性阶段；
- 3) 65 T-85 T，弹性卸载过程中，导体材料反向受压；

四、总结



总结：

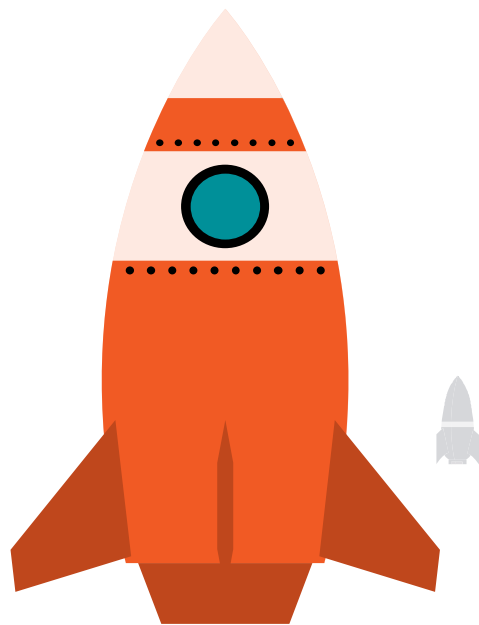
- 1) 建立了二维轴对称全耦合分析模型；
- 2) 分析了脉冲磁体的结构变形引起的磁体电感值变化；

下一步计划：

- 1) CuNb合金材料的本构模型建模；
- 2) 重复加载条件下，磁体结构累积塑性变形的仿真；

参考文献

- [1]Witte H, et al. Pulsed Magnets—Advances in Coil Design Using Finite Element Analysis. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006,16(2):1680-1683.
- [2]宋运兴. 高场磁体的多物理场耦合作用机理[D]. 华中科技大学, 2012.
- [3]Sun Q Q, et al. Fatigue Properties of Cu-Nb Conductor Used for Pulsed Magnets at the WHMFC. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014,24(3):1-4.
- [4]Song Y X, et al. Electrical and Thermal Modeling of Pulsed Magnets Using Finite Element Analysis. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010,17(3):1785-1789.



谢谢

E-mail: jiangfan2938@gmail.com

