

# 基于 ALE 方法的脉冲磁体不可逆电感变化计算

蒋帆<sup>1</sup>, 孙衢骏<sup>1</sup>

1. 华中科技大学, 武汉脉冲强磁场中心, 武汉, 430074

## 引言

目前, 脉冲磁体广泛采用导体绕组和加固材料分层交替绕制的工艺(内部层间加固), 以提高磁体的整体结构强度。磁体在长期的放电工作过程中, 反复经历强电磁力的作用, 导体材料(一般为纯铜、铜合金或铜基复合材料)在重复的加卸载过程中存在着塑性应变的累积效应, 即棘轮效应。导体材料塑性应变的逐渐累积, 导致了磁体不可逆电感值的不断增加。因此, 磁体的不可逆电感变化值可表征磁体内部的整体变形情况, 可用于脉冲磁体的疲劳失效预测。

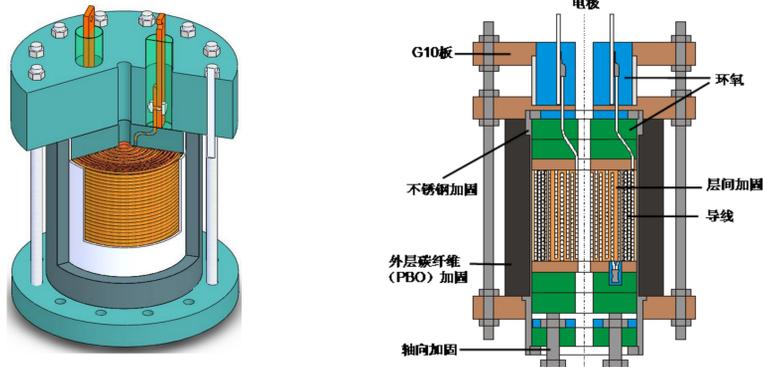
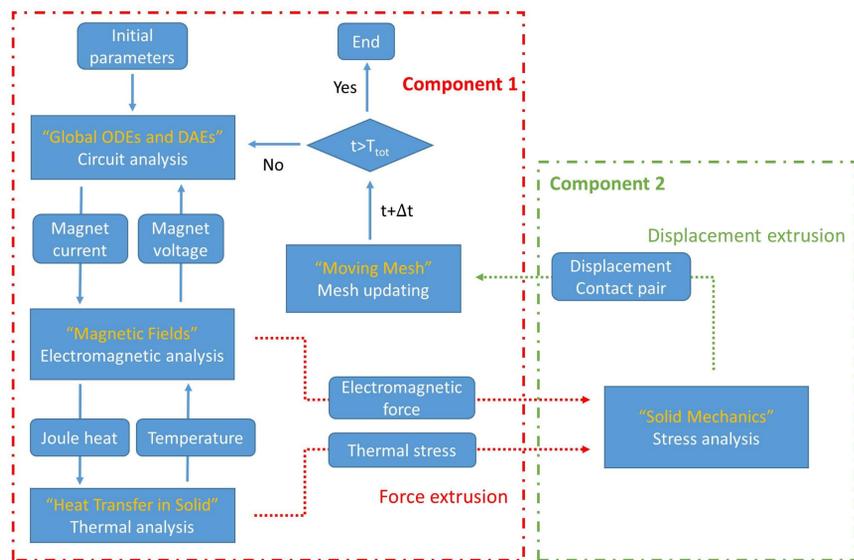


图 1. 脉冲磁体结构示意图

本文基于 COMSOL Multiphysics® 5.1 软件, 对脉冲磁体的放电过程建立了电路、电磁场、温度场及结构场的二维轴对称全耦合模型。考虑了放电过程中集肤效应对磁体电阻、电感的影响; 在结构场中引入了接触对, 采用罚函数法对磁体内部的层间分离机制进行了有效的模拟; 利用拉伸耦合变量, 基于 ALE 方法计算了脉冲磁体在服役过程中, 磁体几何变形引起的电感变化以及由于导体材料塑性应变的累积而导致的磁体不可逆电感变化。

## 多物理场耦合模型

脉冲磁体的放电过程主要涉及到电路方程、磁场、温度场、结构场以及移动网格的耦合计算, 基于各物理场之间的强耦合关系, 建立了二维轴对称全耦合分析模型。



Flowchart of the implemented algorithm

图 2. 脉冲磁体多物理场耦合分析流程图

## 层间分离机制

为了在电磁-结构耦合分析中引入接触对, 实现了对磁体内部层间分离机制的有效模拟。采用了多组件的方式建模, 组件1使用组合物, 组件2使用装配体, 利用拉伸耦合变量实现各组件之间物理量的传递。

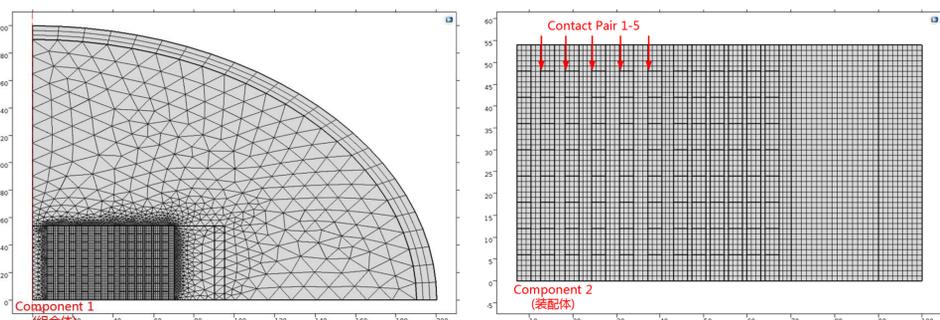


图 3. 各组件的网格剖分图

## 仿真结果

基于多物理场耦合模型, 通过瞬态仿真计算得到的磁体电流电压波形图, 峰值时刻的磁场分布图、应力分布图以及网格变形图如下所示。

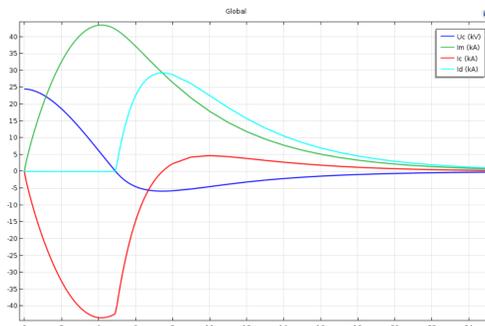


图 4. 磁体电流电压的波形图

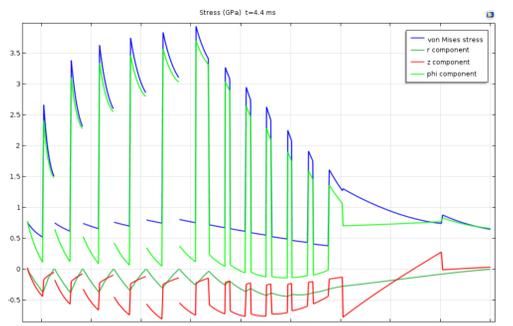


图 5. 峰值时刻的中平面应力分布图

AC/DC模块中的“单匝线圈域”自动考虑了涡流效应的影响, 线圈组中内置的物理量线圈电压能方便地与电路方程进行耦合。

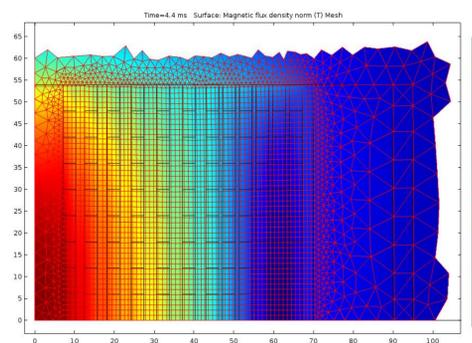


图 6. 峰值时刻的磁场分布图及网格变形

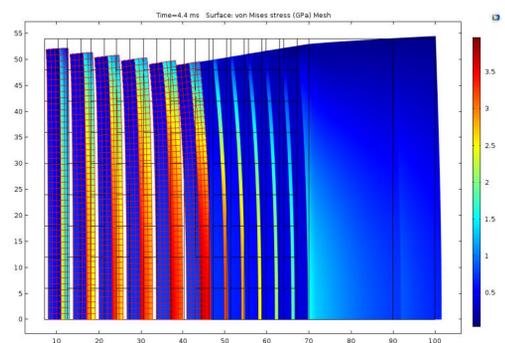


图 7. 峰值时刻的磁体结构和网格变形图

采用罚函数法对接触对进行求解, 收敛速度较快。接触对的引入简化了几何建模流程, 实现了内层单元之间的层间分离, 阻断了拉应力的传递, 使得磁体内部应力分布更为均匀。

## 结论

在低磁场阶段, 导体材料处于弹性阶段, 磁体不产生不可逆电感值变化; 随着磁场的升高, 导体进入塑性阶段, 磁体的不可逆电感变化值不断增大; 当磁场增加到一定程度, 加固材料在弹性卸载过程中会使导体材料反向受压, 因此不可逆电感变化值逐渐趋于稳定。

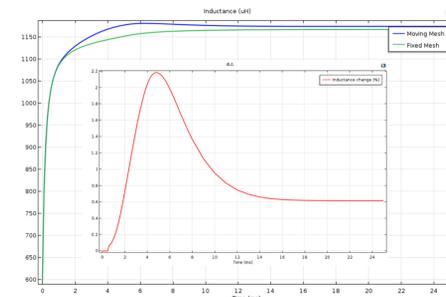


图 8. 磁体的电感随时间的变化图

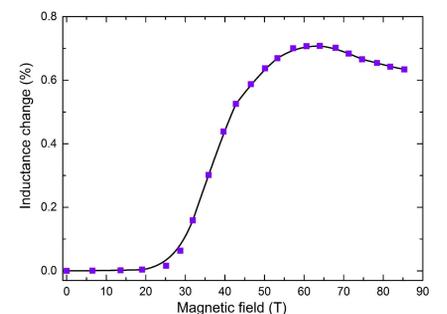


图 9. 不同磁场强度下的不可逆电感变化值

建立的有限元模型分析了脉冲磁体的结构变形引起的磁体电感值变化, 计算得到了放电过程中电感的相对变化量, 这反映了导体材料在电磁力作用下的加载和卸载过程, 以及导体材料不可恢复的塑性应变。磁体不可逆电感变化的仿真分析结果可指导磁体的失效预测。

## 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.