



华中科技大学



脉冲强磁场中心
PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER

COMSOL 2010年中国区用户年会

强磁场技术及其应用

宋运兴

email: yunxingsong@foxmail.com

华中科技大学国家强磁场中心

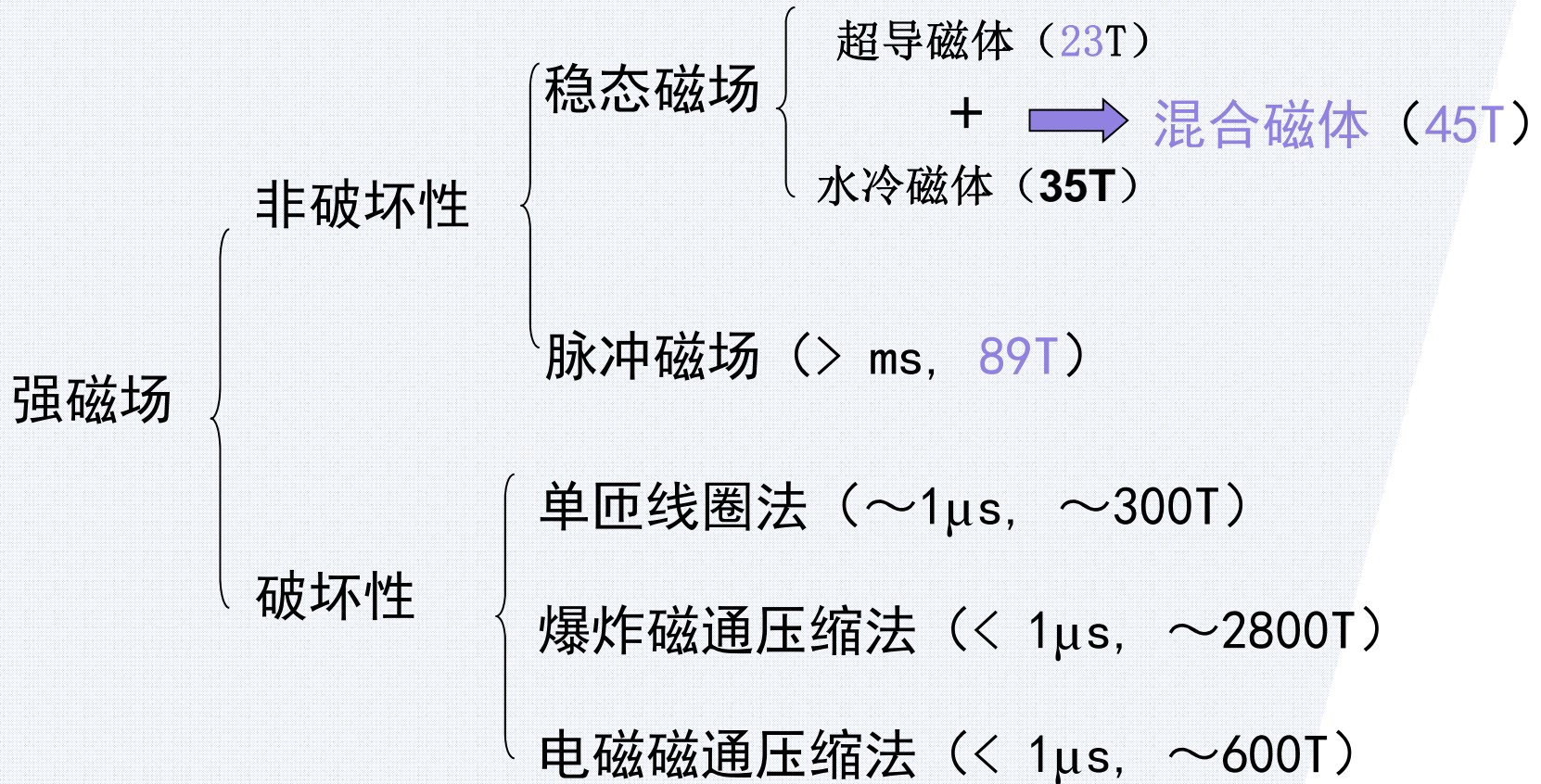


提纲

- 一、强磁场概述
- 二、多级脉冲磁体设计方法
- 三、100T设计方案
- 四、强磁场的工业应用



一、强磁场概述





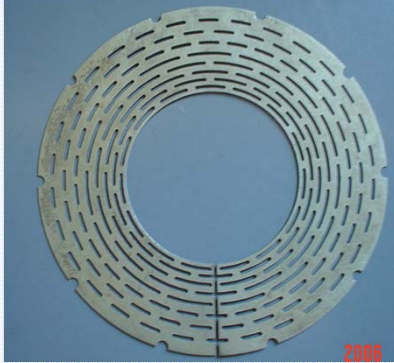
华中科技大学



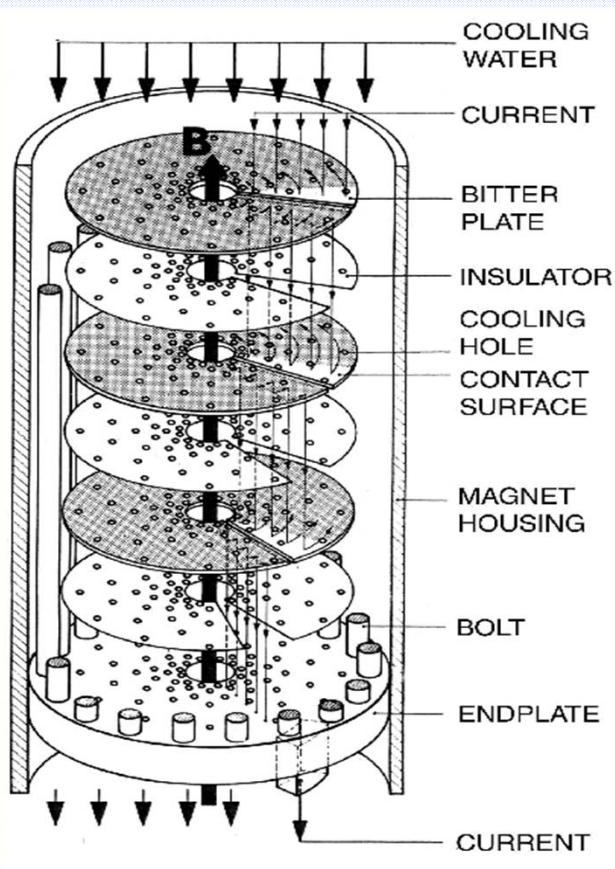
脉冲强磁场中心

PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER

水冷磁体与混合磁体



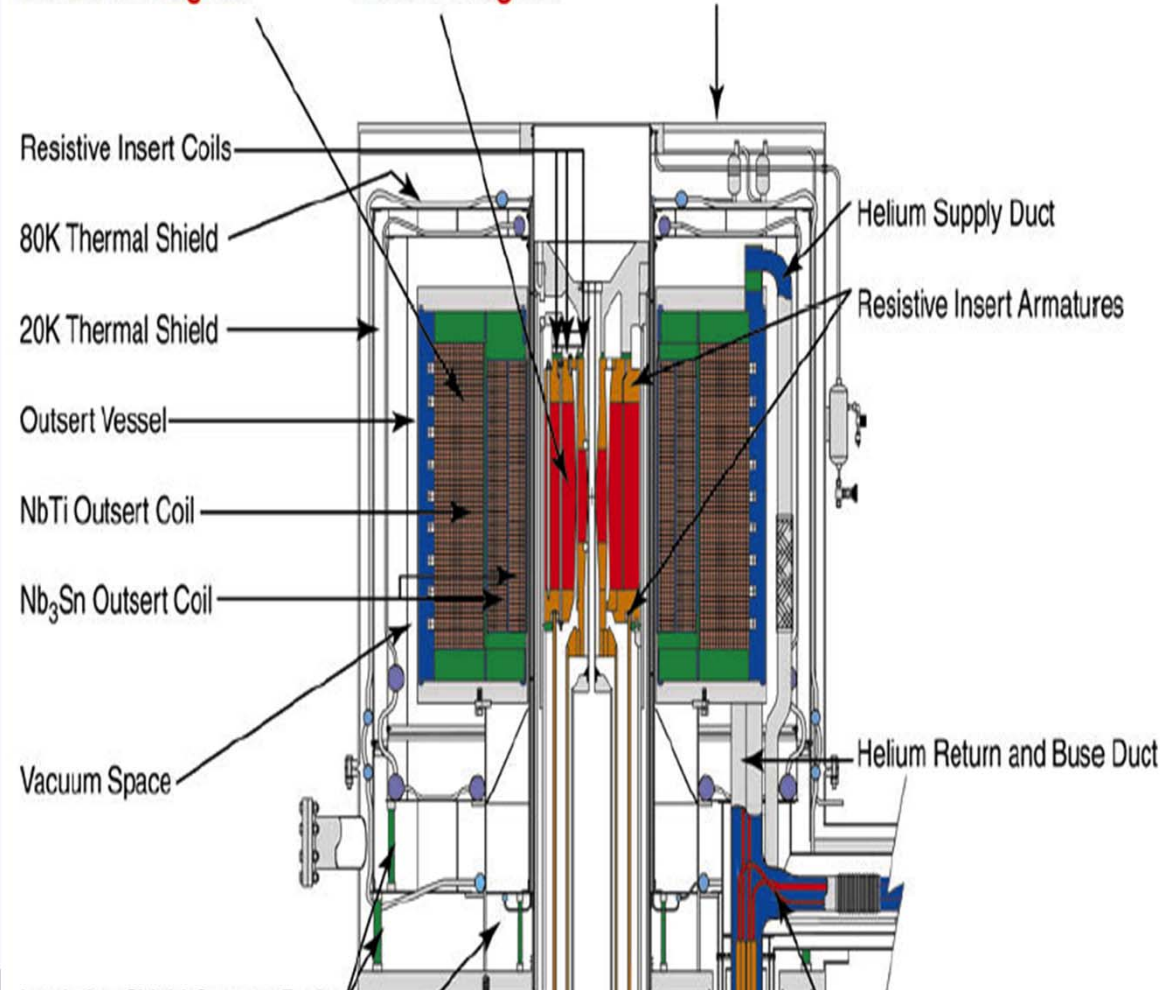
2008



Superconducting
Outsert Magnet

Resistive
Insert Magnet

Outsert Magnet Cryostat

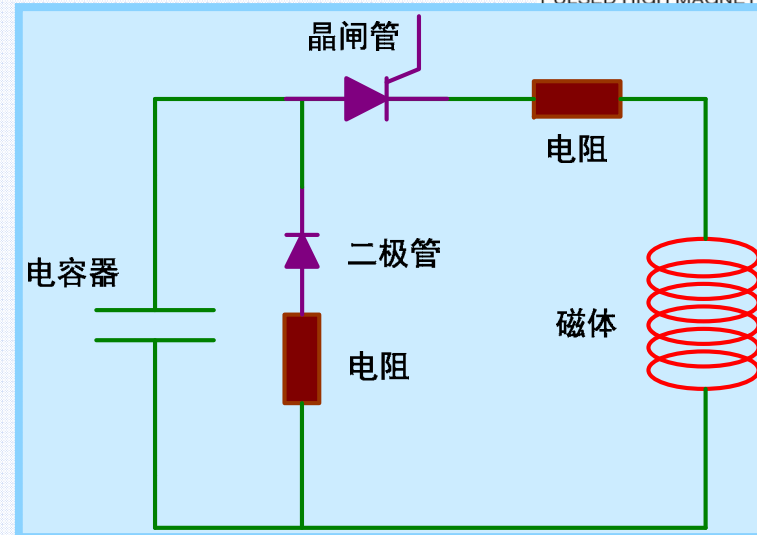




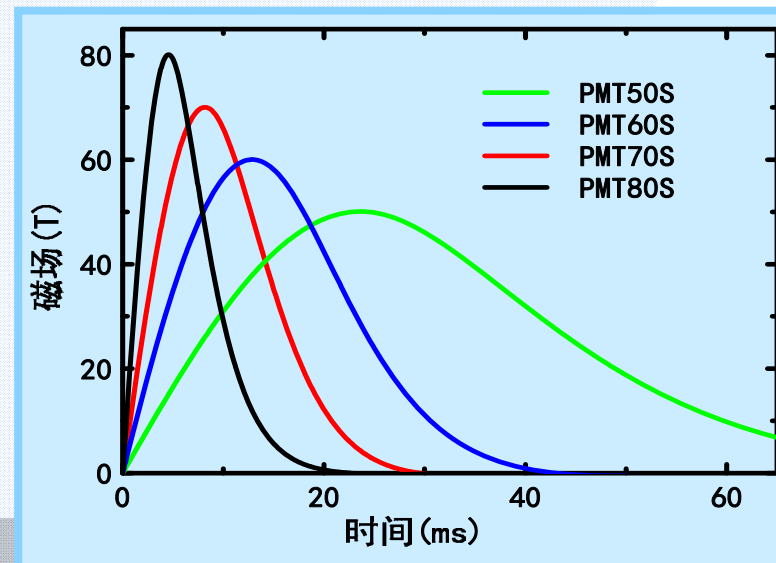
短脉冲磁体

电路设计图

单线圈 + 单电容器电源



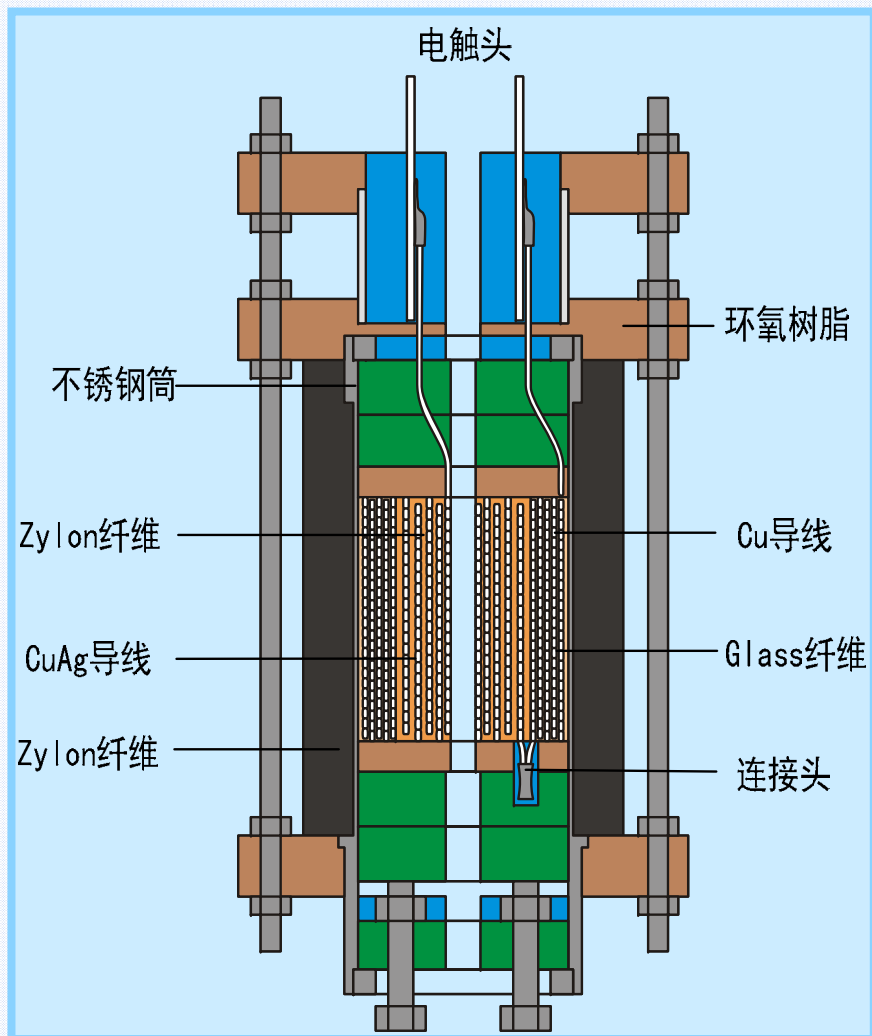
磁场波形



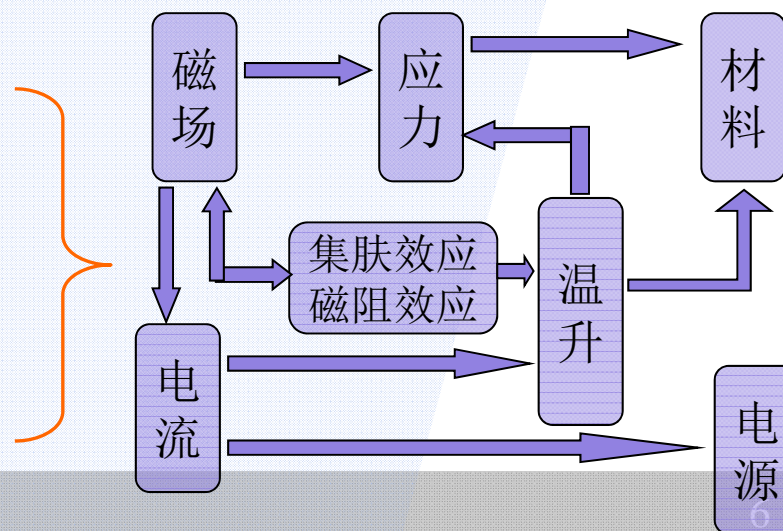
短脉冲强磁体



2008.05.29 10:07

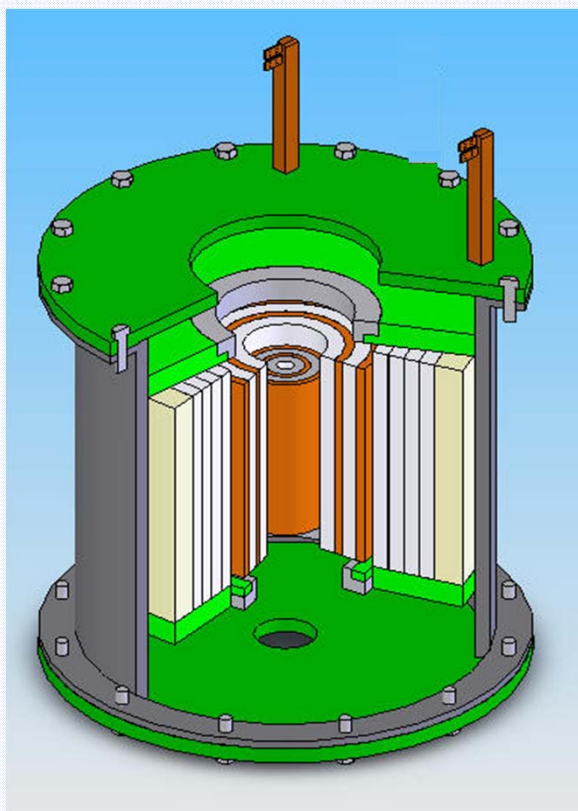


电磁场
+
温度场
+
结构场

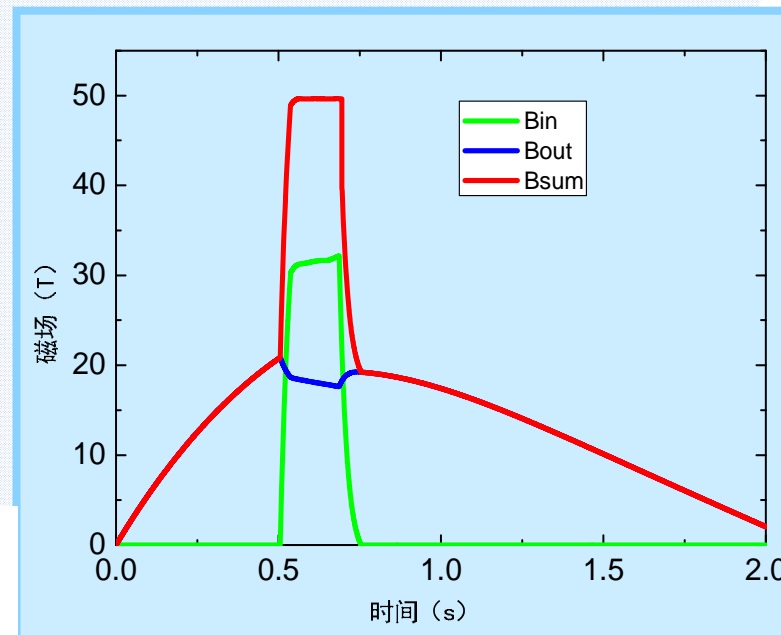
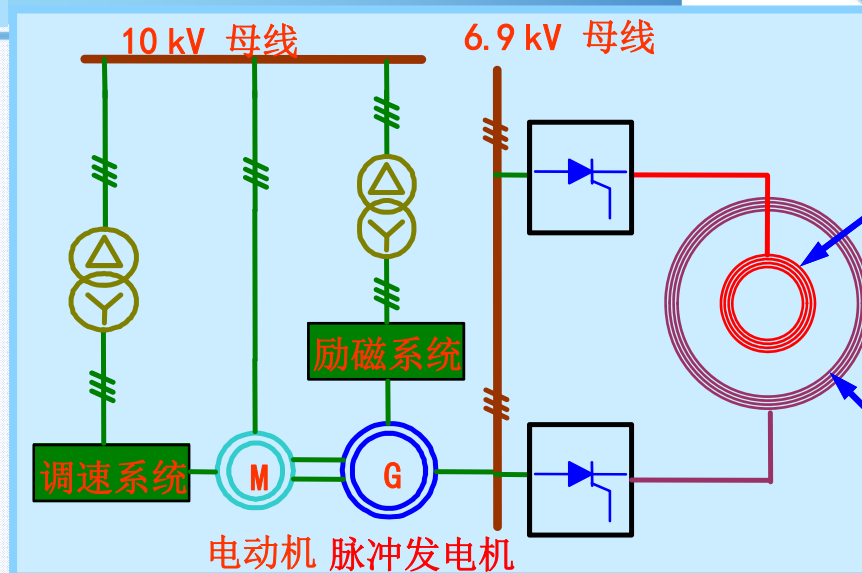


长脉冲磁体

双线圈 + 脉冲发电机电源



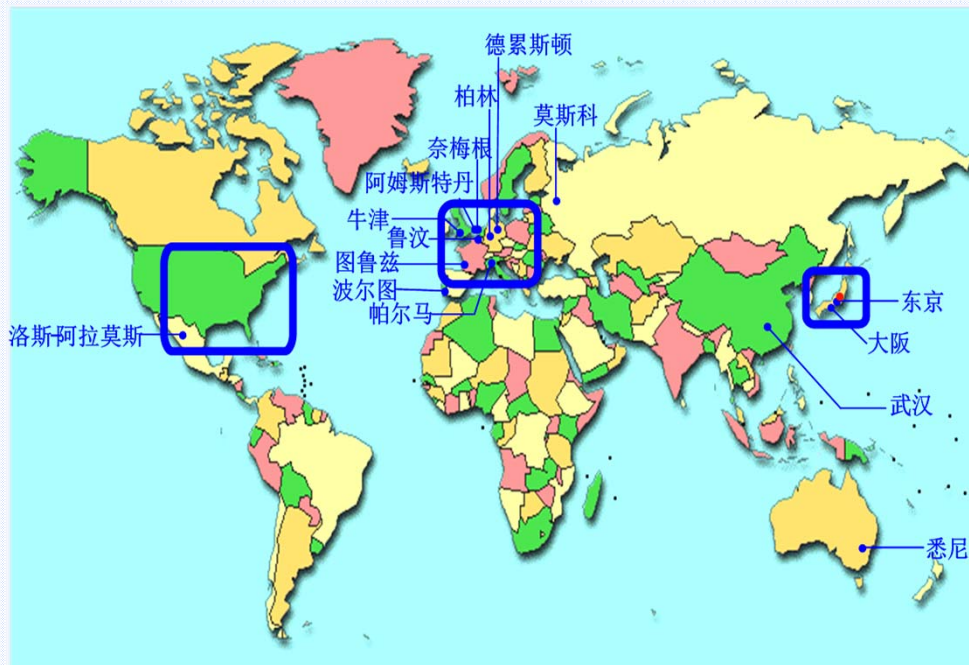
外线圈产生背景磁场，内线圈产生叠加磁场。



脉冲强磁场研究

磁场是研究物理现象和机理的重要工具，磁场强度越高，给科学研究提供的机遇越大。脉冲强磁场装置是产生高强磁场最有效的手段。

全世界已建有30多个脉冲强磁场实验室，主要分布在美国、欧洲等发达国家，我国在武汉建设了第一个大型脉冲强磁场装置。



世界三大脉冲强磁场实验室

美国洛斯-阿拉莫斯脉冲强磁场国家实验室

法国图卢兹脉冲强磁场国家实验室

德国德累斯顿脉冲强磁场实验室



强磁场下的科学研究概况

强磁场条件下的科学研究已取得丰硕的成果。自1913年以来与磁场相关的诺贝尔奖就有19个，其中1项医学奖，5项化学奖，13项是物理学奖。

近年来，国际上强磁场条件下的科学研究工作非常活跃，涉及的学科众多，如物理学、化学、材料科学、地球科学、生命科学与医学等。



二、多级脉冲磁体设计方法

多级脉冲磁体设计可以分为两种情况：内级线圈设计和最外级线圈设计。假设忽略电磁耦合，内级线圈设计需要考虑外级线圈的影响。而最外级线圈设计则不需要。

内外级线圈的概念：如果当前级后面还有其他级，则当前级为内级，当前级后面的级都为外级；如果当前级后面无其他级，则当前级为最外级。内级线圈和外级线圈所表现出的性质差异主要是由于背景磁场的存在造成的。

材料混合法则:

$$[\sigma] = \{f_A[\sigma_A] + f_B[\sigma_B]\} \geq \sigma_{hm} \quad (1)$$

内级线圈约束关系:

$$\sigma_{him} = \begin{cases} f_{hi}(1) = \frac{B_i(B_i + B_o)}{\mu_0(\alpha_i - 1)}, \alpha_i \leq \frac{2B_i + B_o}{B_i + B_o} \\ f_{hi}(\varepsilon_p) = \frac{[\alpha_i B_i + (\alpha_i - 1)B_o]^2}{4\mu_0(\alpha_i - 1)^2}, \frac{2B_i + B_o}{B_i + B_o} < \alpha_i < \frac{B_o}{B_o - B_i} \\ f_{hi}(\alpha_i) = \frac{B_i B_o \alpha_i}{\mu_0(\alpha_i - 1)}, \alpha_i \geq \frac{B_o}{B_o - B_i} \end{cases} \quad (2)$$

外级线圈约束关系:

$$G = \frac{B_o}{\sqrt{2\mu_0\sigma_{hom}}} = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}(\alpha_o - 1)}{\alpha_o}; & \alpha_o \geq 2 \\ \sqrt{\frac{\alpha_o - 1}{2}}; & \alpha_o \leq 2 \end{cases} \quad (3)$$

外级线圈功耗约束关系:

$$B_o = \mu_0 \sqrt{\frac{f_o W}{\rho a_o}} G(\alpha_o, \beta_o) \quad (4)$$

目标磁场约束方程:

$$B_i + B_o = B_{tot} \quad (5)$$

由 (3) 以及 (4) 得到:

$$a_o = \frac{\mu_0 f_o W G(\alpha_o, \beta_o)^2 \alpha_o^2}{4\rho\sigma_{hom}(\alpha_o^2 - 1)^2} \geq \frac{\mu_0 f_o W G(\alpha_o, \beta_o)^2 \alpha_o^2}{4\rho[\sigma](\alpha_o^2 - 1)^2} \quad (6)$$

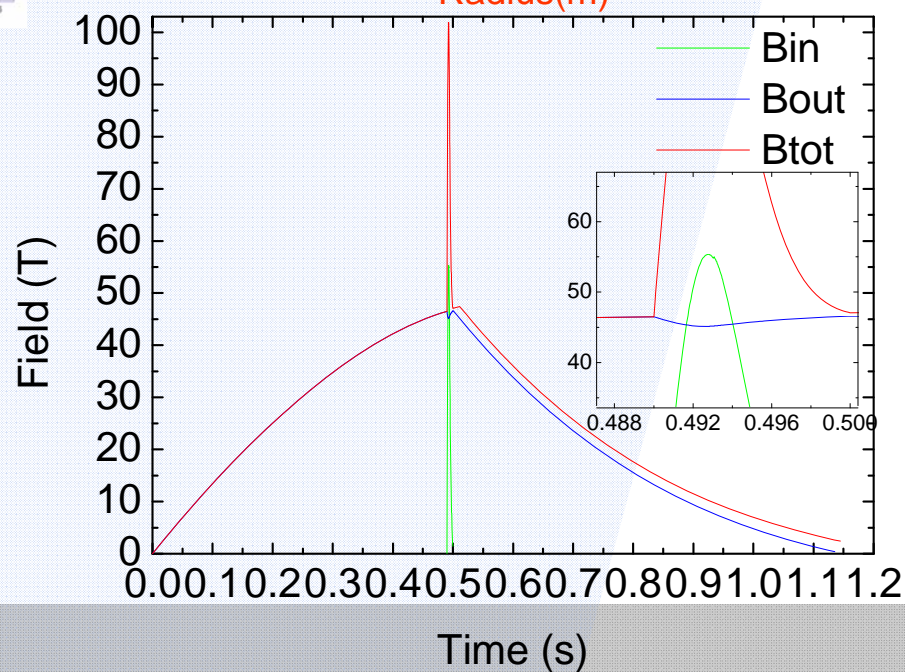
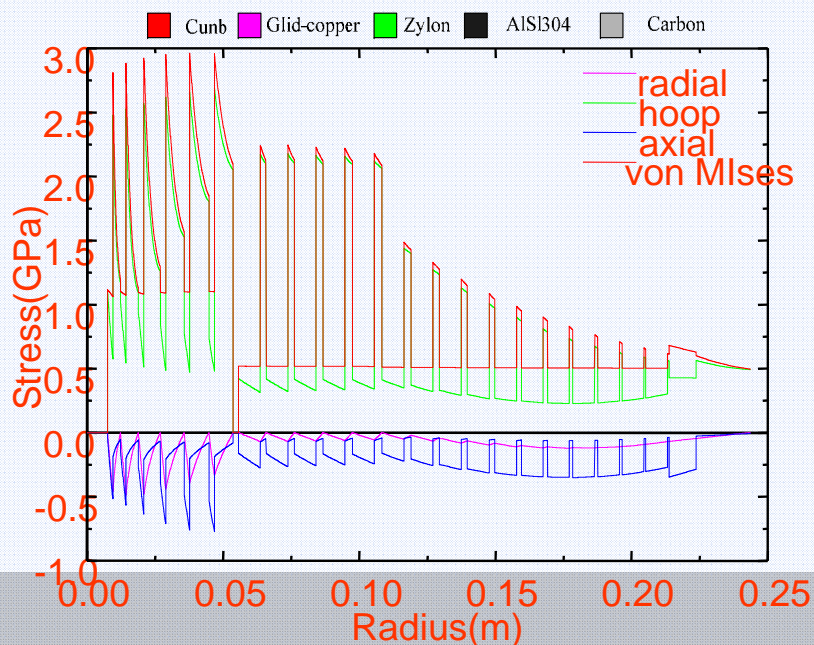
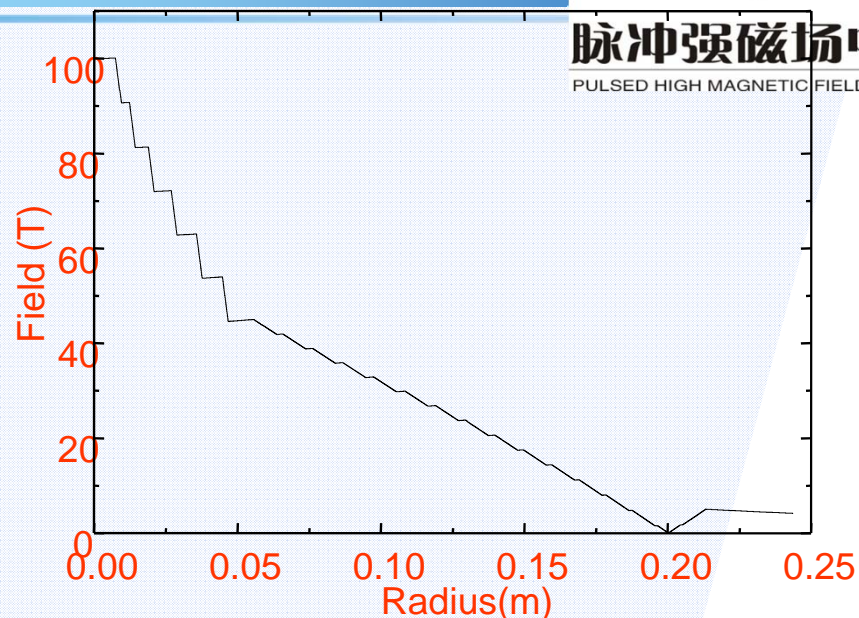
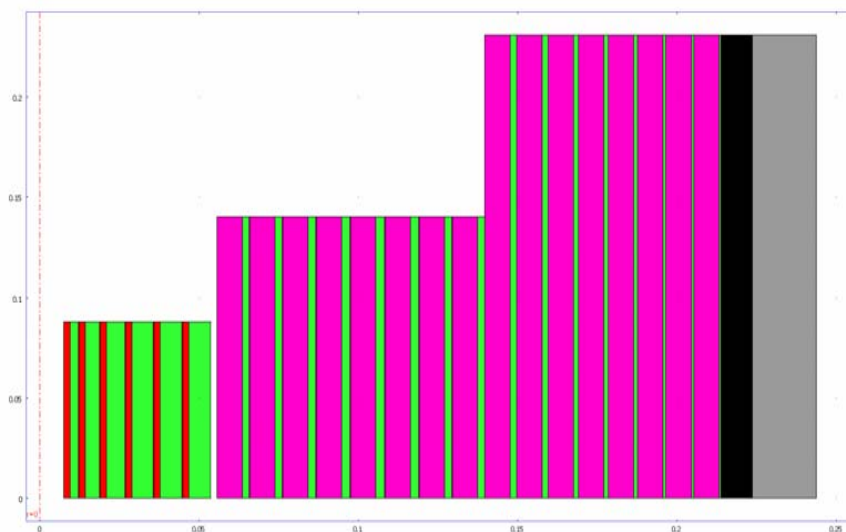
给出外线圈的参数就能确定内线圈参数，给出一系列的外线圈参数，就能得到一系列的内线圈参数，然后看他们的交集。

三、100T设计方案

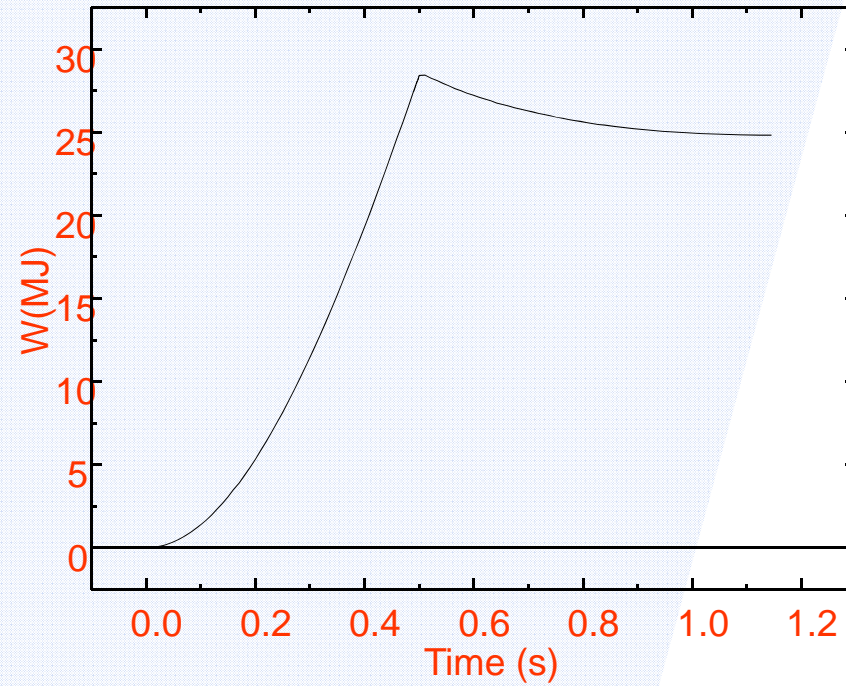
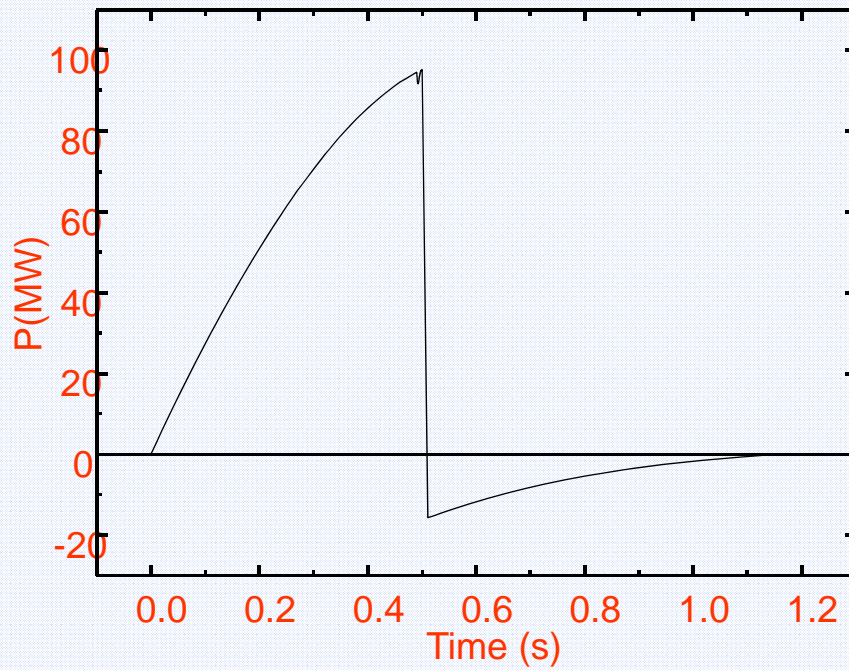


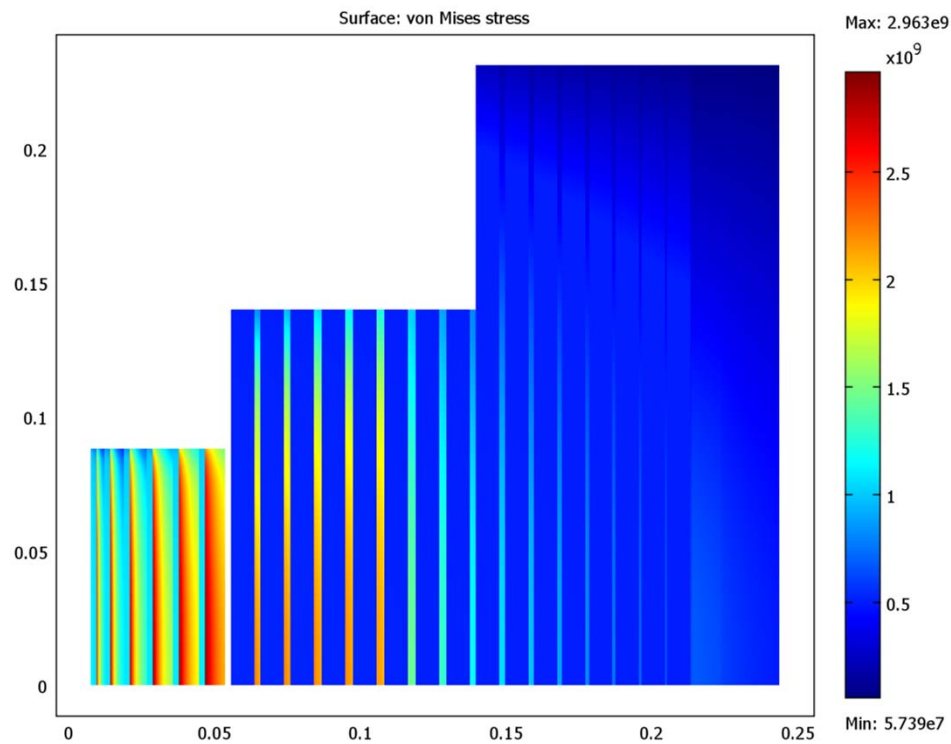
双线圈系统 (B1=54T, B2=46T)。内级线圈由电容器供电, 外级线圈由电机供电。

脉冲强磁场中心
PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER

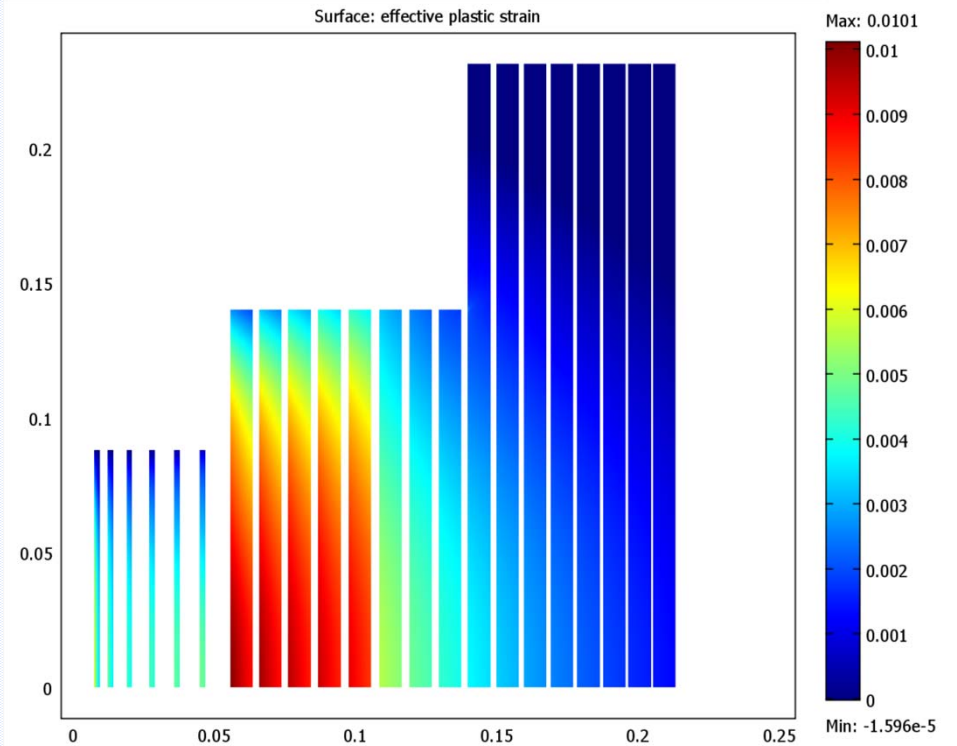


电机的功率和能量随时间的变化





应力分布图



等效塑性应变分布图

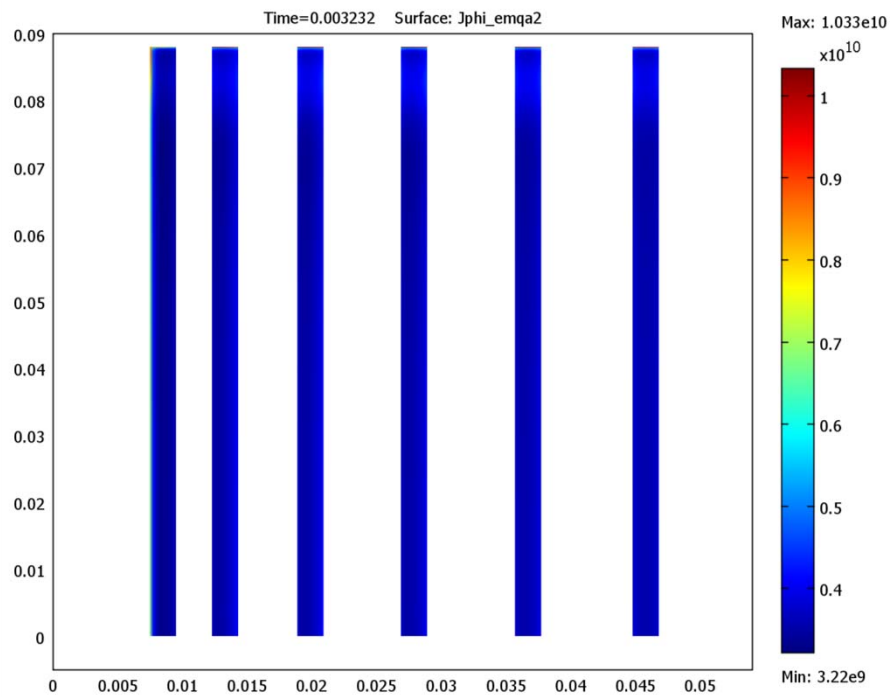


华中科技大学

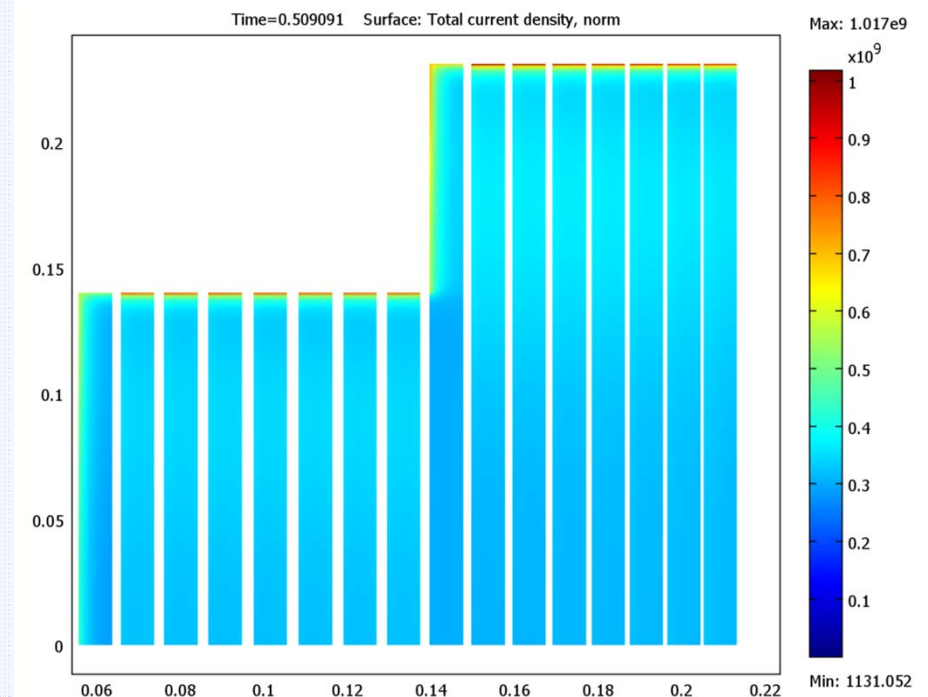


脉冲强磁场中心
PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER

峰值时刻电流密度分布



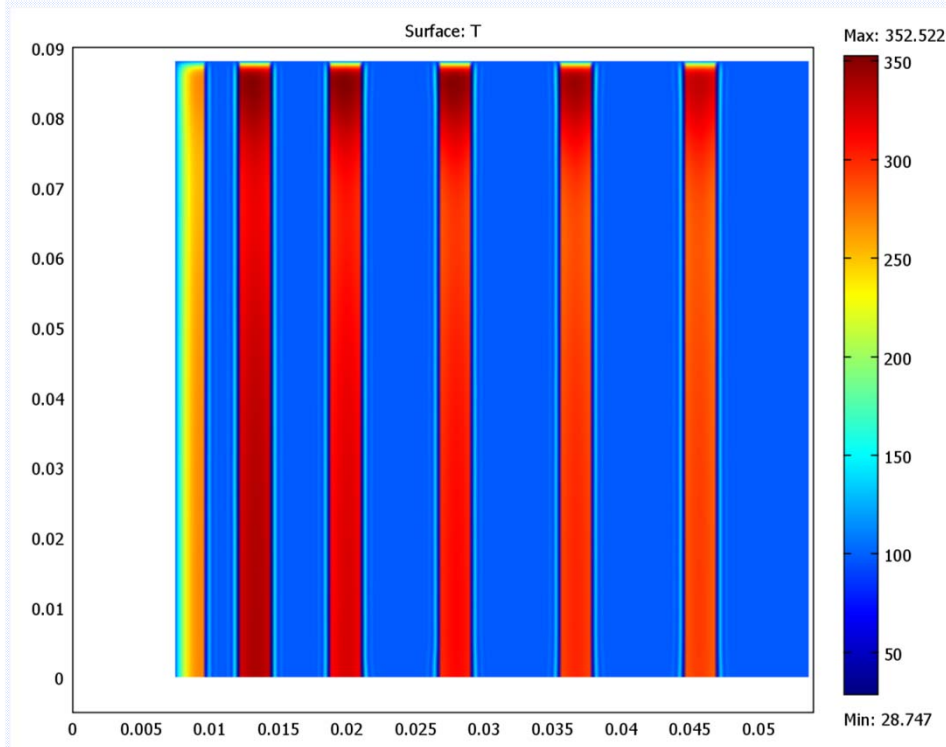
内级线圈



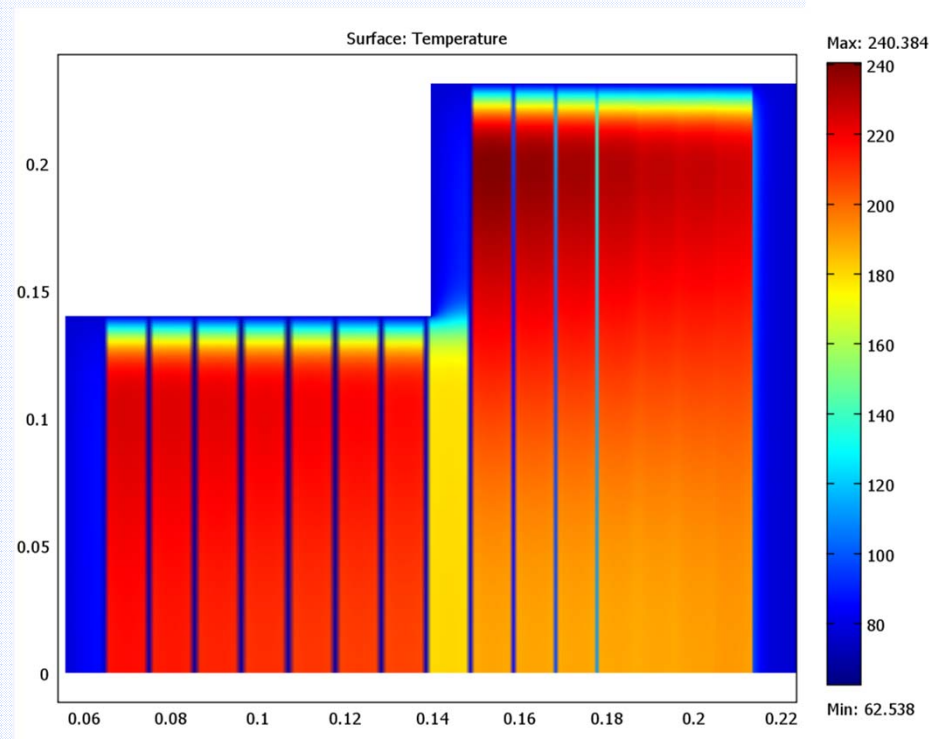
外级线圈



温度分布



内级线圈放电结束时刻温度分布图



外级线圈放电结束时刻温度分布图



四、强磁场的工业应用

- 1、大型永磁设备整体充磁技术
- 2、大制动转矩涡流缓速技术
- 3、电磁成形技术
- 4、磁制冷技术
- 5、磁选矿
- ...

大型永磁设备整体充磁技术



脉冲强磁场中心
PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER



磁共振成像

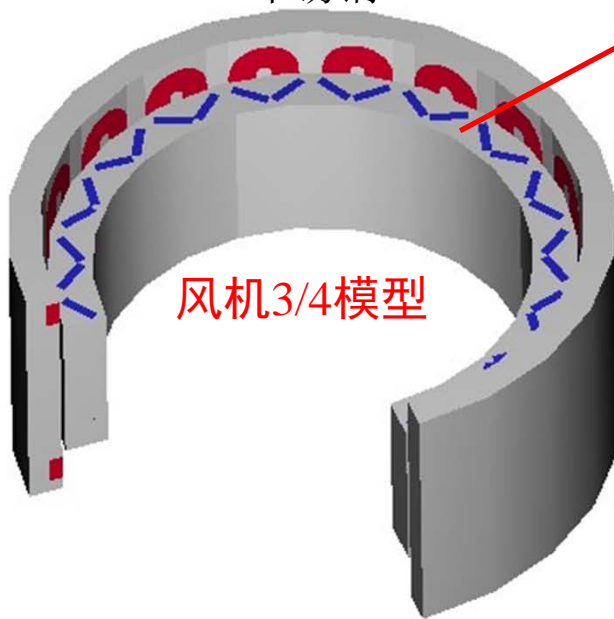
传统方法：安装耗时、成本高、危险较大无法实地退磁

整体充磁方案：大型脉冲线圈整体后充磁，具有安装简单、成本低、安全性高、可实地退磁。目前能实现1.5MW风力发电机转子整体充磁。

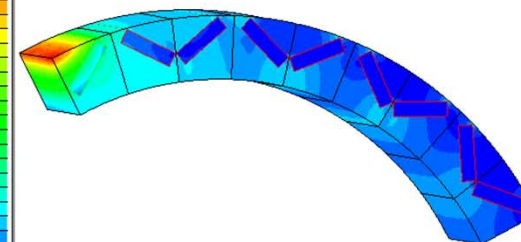
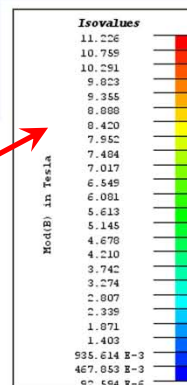


风力发电机

- :脉冲线圈
- :永磁体
- :不锈钢



风机3/4模型



1/8有限元模型



3.5T充磁线圈
储能：14MJ
直径：2米

大转矩电涡流缓速器技术



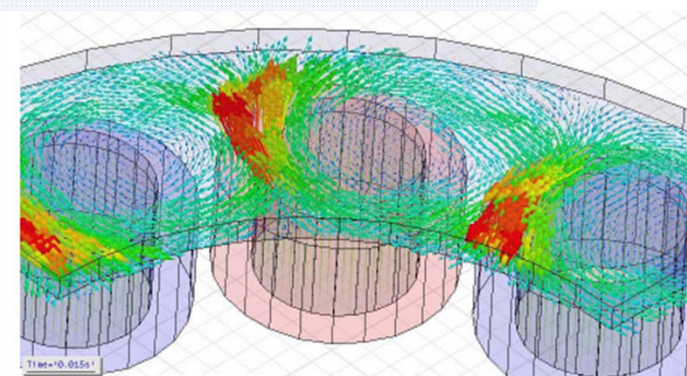
脉冲强磁场中心
PULSE STRONG MAGNETIC FIELD CENTER



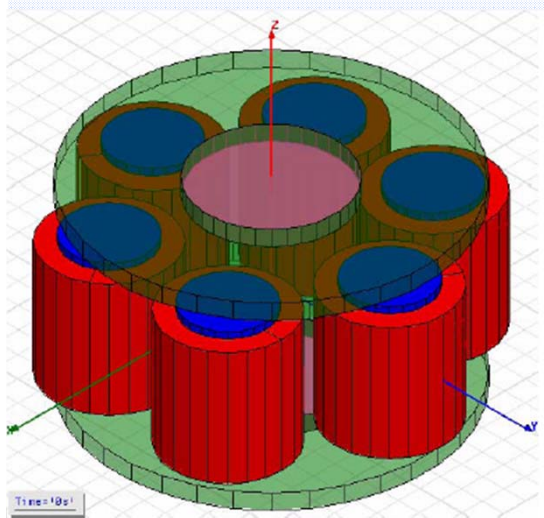
依靠磁场与电流的相互作用力，产生制动转矩，与传统机械制动相比，具有非接触式、无机械摩擦、制动平缓、寿命长、维护简单等优点。

关键技术：分析电磁场空间分布，优化制动器结构，控制励磁线圈与转子盘温升，在满足力学强度条件下产生尽可能大的电磁转矩，以达到高效、可靠的制动。

非常适合高速列车、载重卡车、轿车等交通工具，应用前景广阔。



目前实现 $3000\text{N}\cdot\text{m}$ 以上制动转矩方案，可满足载重卡车、高级轿车制动需要。



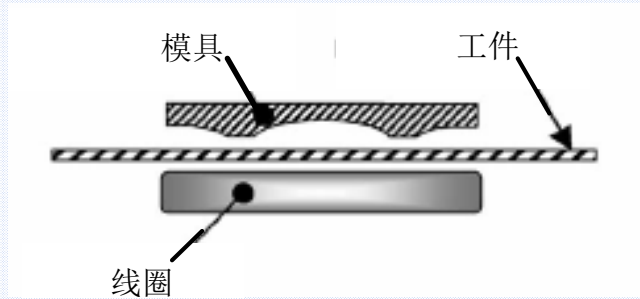


华中科大 电磁成形技术

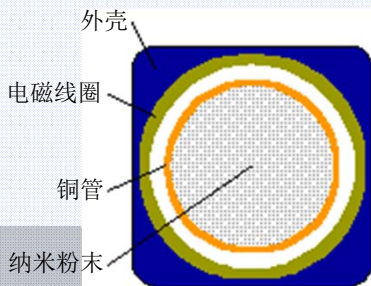
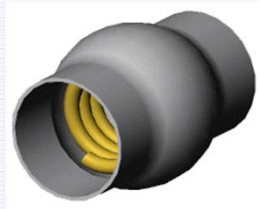
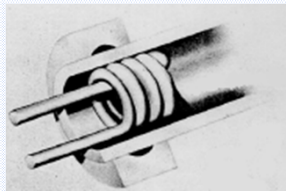
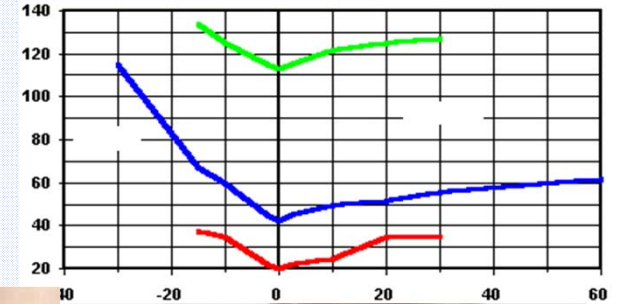


脉冲强磁场中心
PULSED HIGH MAGNETIC FIELD CENTER

利用交变磁场在工件中产生涡流，涡流与磁场作用产生电磁力，将工件快速推向模具，实现成形。具有非接触、无需润滑油脂、无机械磨损、可改善应变分布、减少起皱现象、主动控制反弹以及减小局部扭曲等诸多优点。



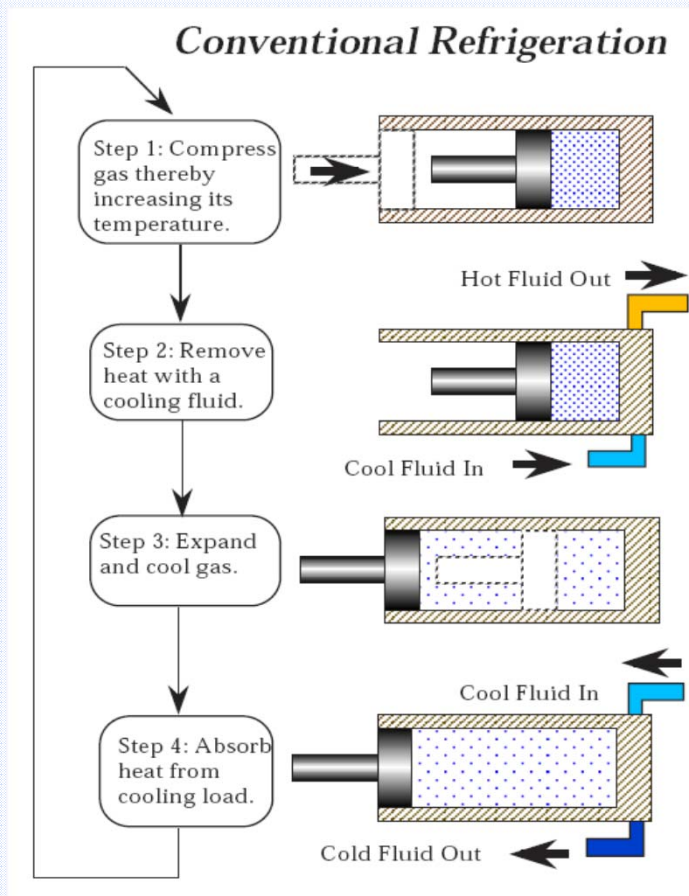
加工工艺：管毛坯缩口涨口、板毛坯成形、电磁铆接
应用领域：汽车、航空航天、电器、兵器工业等



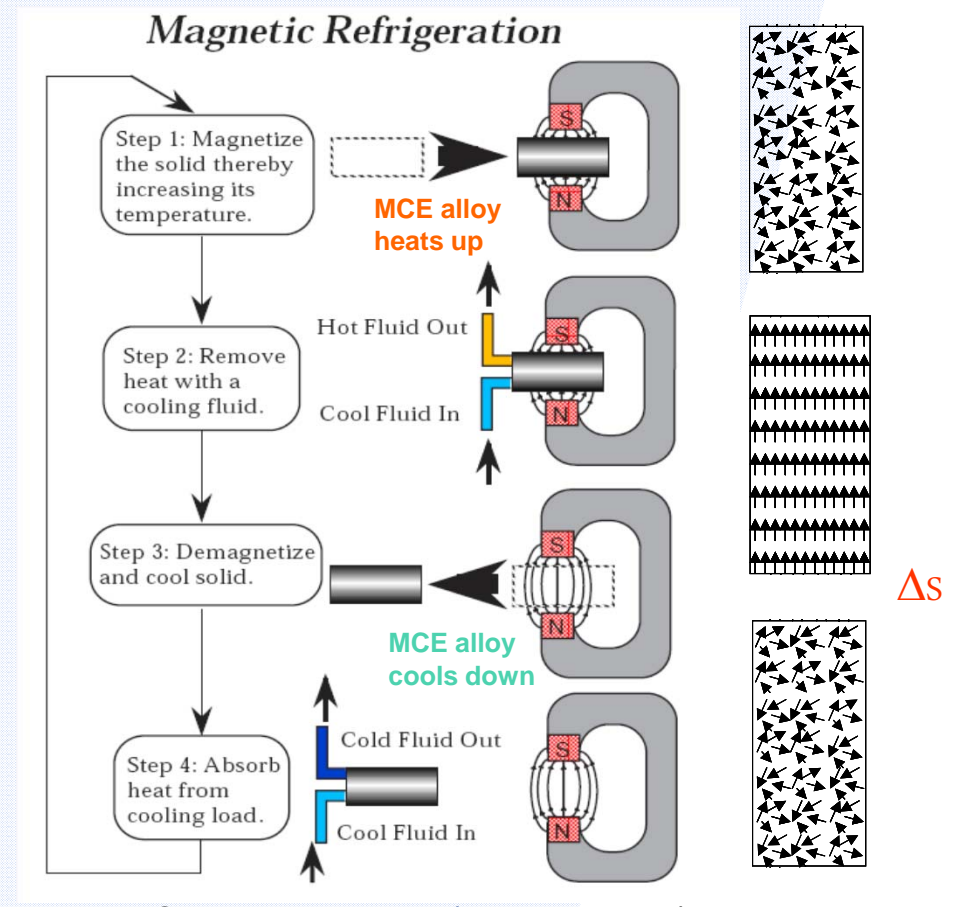
电磁成形试验结果



Adiabatic Compression/ Expansion of gases



Adiabatic mag/demag of MCE materials



MCE materials heat/cool on mag./demag.



利用矿物磁性的差异，在不均匀磁场中进行分离。

