

高温超导体交流损耗仿真概论

Speaker: **GU Chen(顾晨)**

Group: Lai Lingfeng(赖凌峰), Timing Qu(瞿体明), Feng Feng (冯峰), ZOU ShengNan(邹圣楠), YUE yubin(岳宇宾), CHEN Duxing(陈笃行), Zhao Kai(赵凯)

内容概要:

1. 交流损耗为什么至关重要
2. 磁通运动模型
3. 电磁仿真技术基础
4. 线圈交流损耗基本行为



清华大学



EASTFORCE 原力超导
SUPERCONDUCTING



中国科学院 海西研究院
泉州装备制造研究所

UAB
Universitat Autònoma
de Barcelona

内容概要：

1. 研究交流损耗为什么至关重要
2. 磁通运动模型
3. 电磁仿真技术基础
4. 线圈交流损耗基本行为

研究背景——为什么要研究交流损耗

电力能源领域

高温超导电缆



(云南电网, 云电英纳)

高温超导限流器



(云电英纳, 天津电网)

高温超导磁储能SMES



(云南电网, 华中科技大学)

高温超导变压器



(中科院电工所)

Where would I put n

- Nb-Ti and Nb₃Sn for sure
- HTS still demands faith in the future
 - REBCO for ultra-high field magnets, may be solved
 - 2212 as a round wire HTS technology full magnet demonstration
- K,Ba/SrFe₂As₂ as potentially the isotropic, affordable, multifilament round wire that can extend Nb₃Sn or even replace it if present connectivity issues are just GB impurity issues
 - And MgB₂ too if I could attain the high H_{c2} of Penn State films into bulk!

Affordable conductors and working science-magnet-manufacturer links are the key to success – more magnets, not just conductor lengths are needed!

Electric utility PULL would be the game changer for HTS.

Prof. David Larbalestier:

Electric utility PULL would be the game changer for HTS

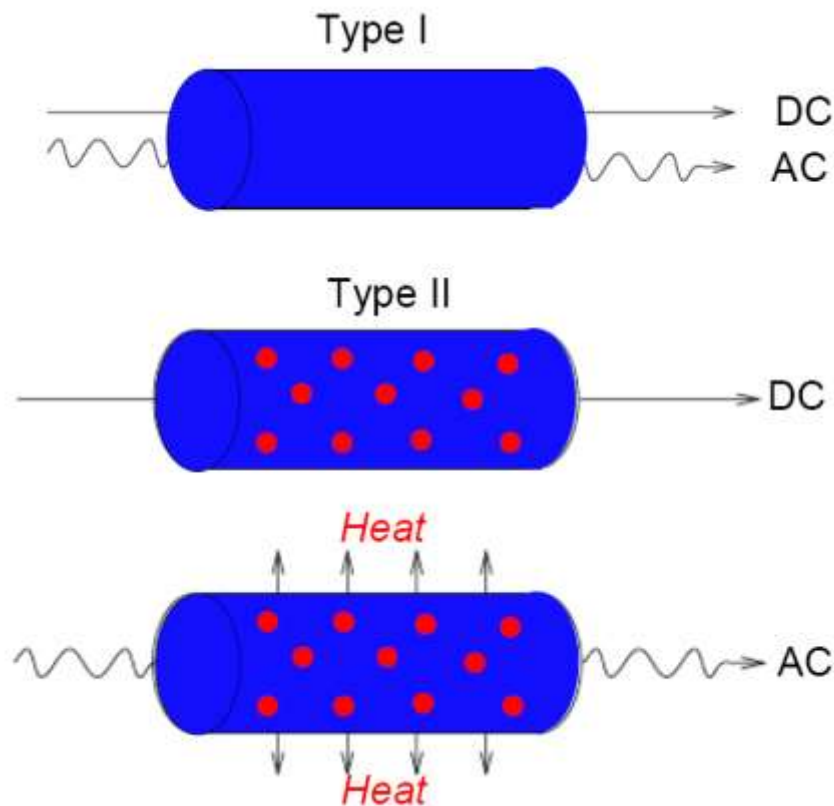


Maturity of HTS power App. (1-9), AC cable:9, DC cable, SCFCL:8-9, approach large scale app

高温超导Demo装置层出不穷，却一直无法大规模推广

WHY?

研究背景——为什么要研究交流损耗



All usable are TYPE-II superconductor.

所有实用化的超导体都是第二类超导体

TYPE-II generates AC loss under AC excitation.

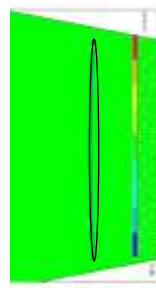
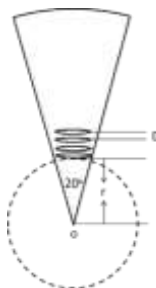
第二类超导体都会产生交流损耗

Interaction of flux with pinning force

损耗来源于磁通变化的瞬间，外磁场克服钉扎力做功。

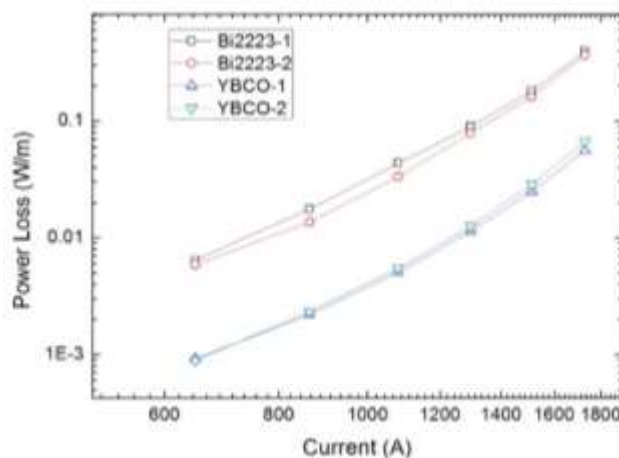
交流损耗被“制冷惩罚”扩大10~100倍。1w交流损耗等效100w常规损耗

研究背景——电缆交流损耗实例



超导电缆每米交流损耗1w/m，总体可接受，所以成为最为成熟的HTS电力应用。

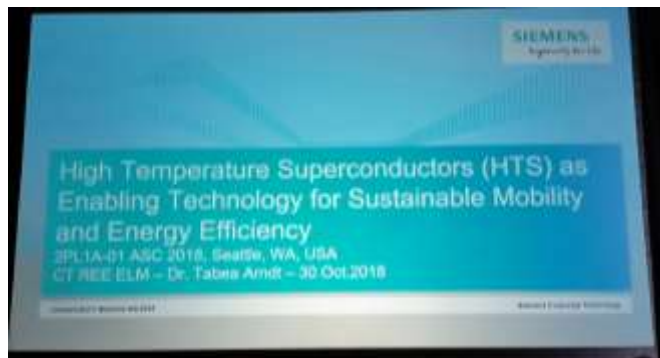
样品名	Ic0	宽厚尺寸 (mm)	生产厂家	工艺方法
Bi2223-1	198.9	4.35 × 0.33	住友公司	高压处理
Bi2223-2	106.8	4.20 × 0.25	英纳公司	传统PIT
YBCO-1	110.0	4.25 × 0.23	Super Power	IBAD
YBCO-2	68.9	4.33 × 0.25	美国超导	RABiT S



YBCO single layer cable is better than that of Bi2223 cable.

AC loss by diff. material

研究背景——研究动力



- Further opportunities might open up when HTS tapes for use in AC fields of small or medium amplitudes are available.

1. ARE THOSE HTS magnet RELIABLE?
高温超导电力设备是否安全可靠?
2. ARE THOSE HTS magnet ECONOMIC?
高温超导电力装备经济运行特性如何?

研究背景——仿真计算与测试的必要性

交流损耗计算，从磁通穿透物理过程，

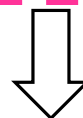


- ✓ 从磁通穿透入手，建立物理层理解基础
- ✓ “场-路”耦合计算。应对各种复杂工况
- ✓ 全区域解耦模型，与精细到每匝模型兼顾
- ✓ 有效的封装，参数化建模降低使用门槛

交流损耗测试



仿真与实验
相互验证



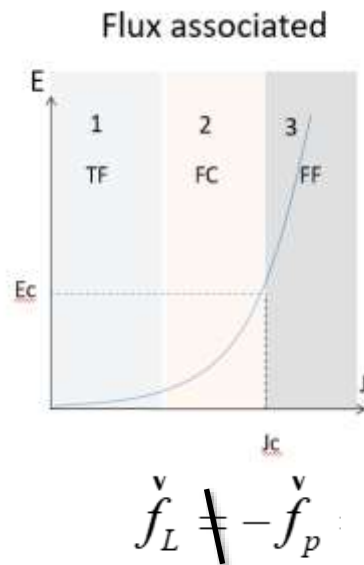
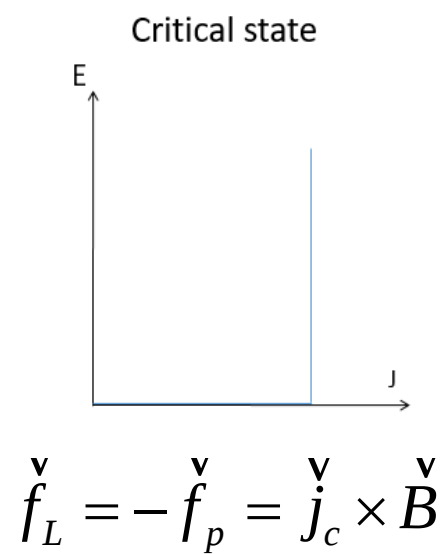
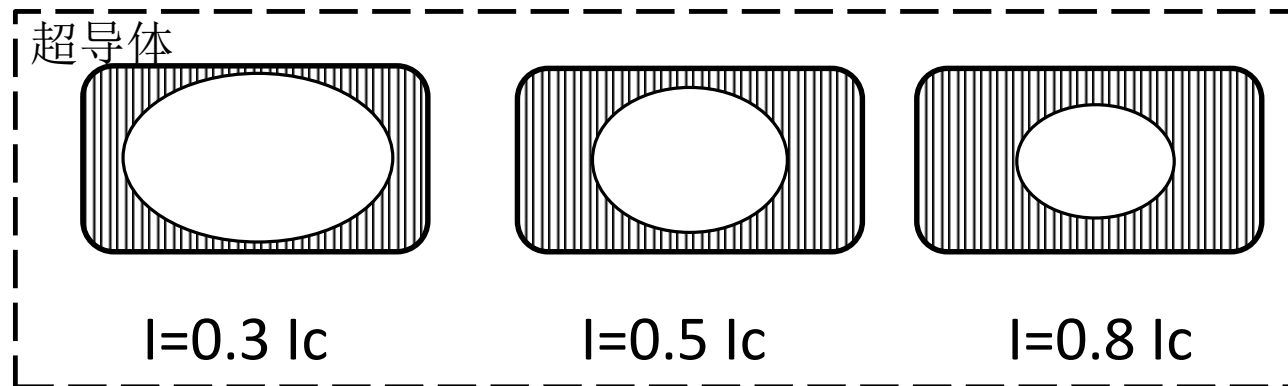
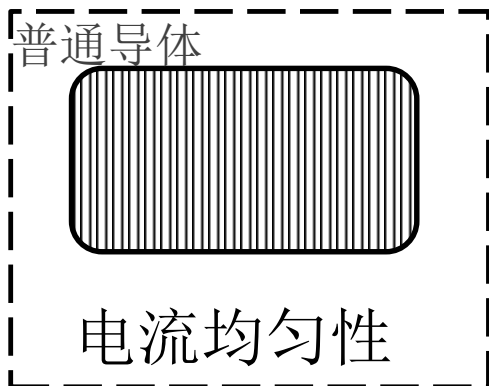
- ✓ 可测试带材、缆线、磁体交流损耗
- ✓ 传输交流损耗，测试交流磁化率
- ✓ 测试精度0.1mV以下，高精度测试；
- ✓ 电测法与热测法

建立超导电力装备的仿真设计方法，并建立相应的检测方法是关键。

内容概要：

1. 研究交流损耗为什么至关重要
2. 磁通运动模型
3. 电磁仿真技术基础
4. 线圈交流损耗基本行为

研究背景——磁通运动模型



$$\textcircled{1} \quad E = 2nE_c \frac{j}{j_{c0}} e^{-n}$$

$$\textcircled{2} \quad E = E_c e^{-n\left(1-\frac{j}{j_{c0}}\right)} \Rightarrow E \approx E_c \left(\frac{j}{j_{c0}}\right)^n$$

$$\textcircled{3} \quad E = \rho_f j_{c0} \left(\frac{j}{j_{c0}} - 1\right)$$

The Critical State Model/Equation 临界态模型/方程

Bean Model

$$j_c(T, B) = \text{const.}$$

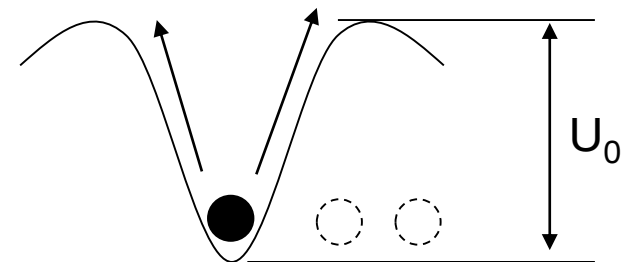
Kim Model

$$j_c(T, B) = \frac{j_c(T, 0)}{1 + B / B_0}$$

Generalized Model

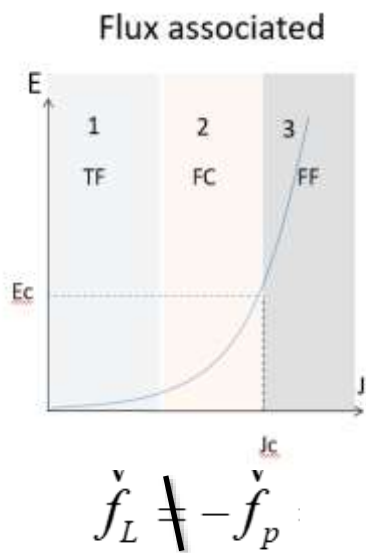
$$j_c(T, B) = \frac{j_c(T, 0)}{(1 + B / B_0)^n}$$

磁通运动模型——E-J power law



Thermally assisted flux creep (FC)
热助磁通蠕动（简记作FC）

$$E = E_c e^{-n\left(1-\frac{j}{j_{c0}}\right)} = E_c \left[\exp\left(\frac{j}{j_{c0}} - 1\right) \right]^n$$



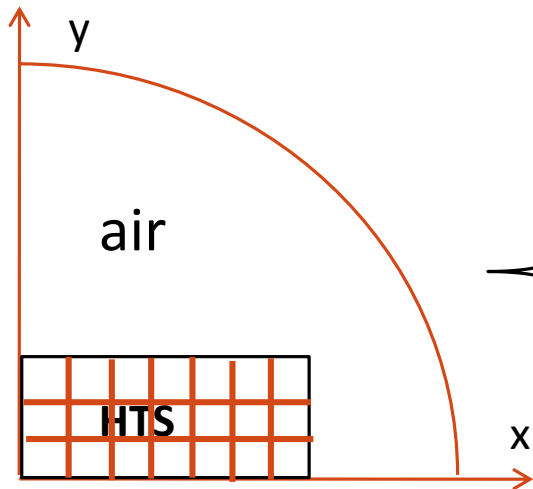
$$= E_c \left[1 + \left(\frac{j}{j_{c0}} - 1 \right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{j}{j_{c0}} - 1 \right)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{j}{j_{c0}} - 1 \right)^3 + \dots \right]$$

$$\underline{\underline{E \approx E_c \left(\frac{j}{j_{c0}} \right)^n \quad (j \approx j_{c0})}} \quad \left\{ \begin{array}{l} n=1 \text{ 常规导体} \\ n=\infty \text{ 临界态} \end{array} \right.$$

内容概要：

1. 研究交流损耗为什么至关重要
2. 磁通运动模型
- 3. 电磁仿真技术基础**
4. 线圈交流损耗基本行为

电磁场计算基础——方程建立

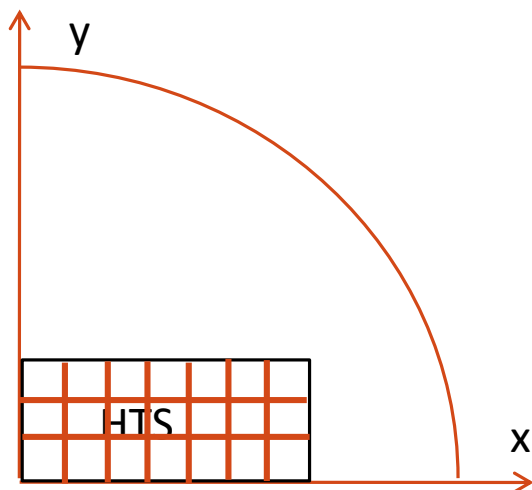


$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times E \\ E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi \\ \nabla \times A = B \\ \nabla \cdot A = 0 \end{array} \right.$$

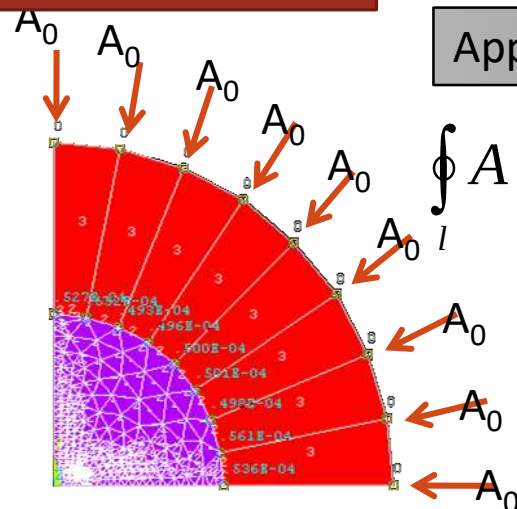
$$\nabla^2 A(r, t) = \mu_0 \sigma(J) \frac{\partial A(r, t)}{\partial t} - \mu_0 J$$

$$\sigma(J) = (J_c / E_c) |J_c / J|^{n-1}.$$

$$\sigma(J) \quad \text{Satisfy} \quad J = J_c$$

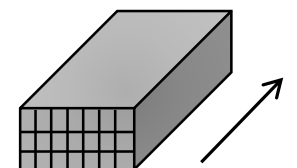


Transport Current

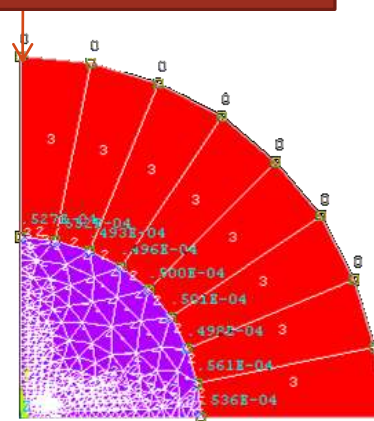


Apply $A=A_0$ at the circular

$$\oint A \cdot dl = I$$

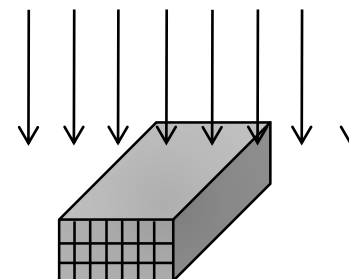


External fields



Apply $A=xB_0$ at the circular

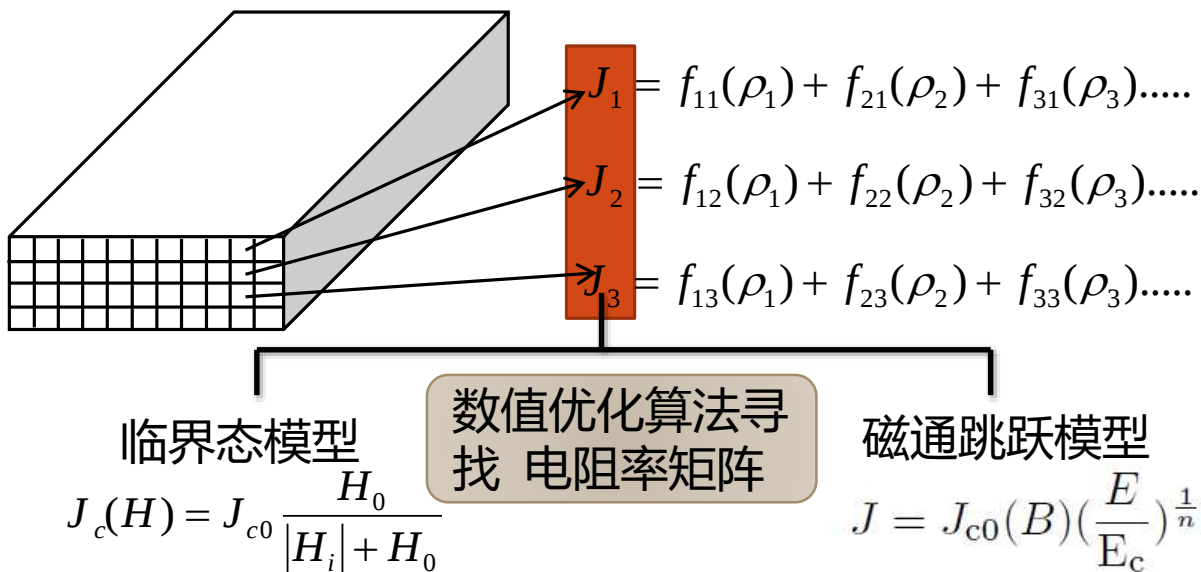
$$\nabla \times A = B$$



Applying A variant at the infinite distance where

$$\nabla \times H = -J$$

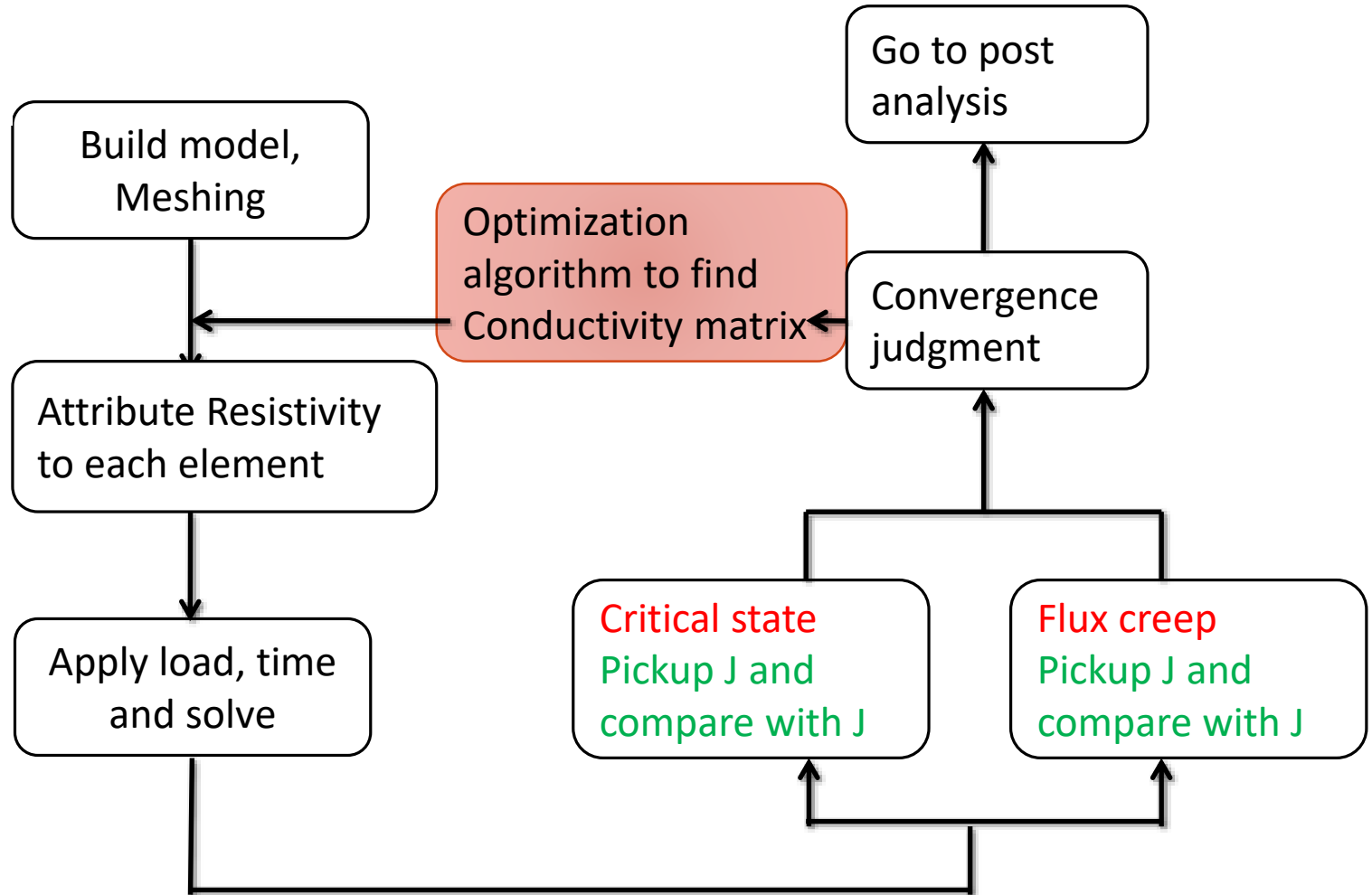
电磁场计算基础——RAA算法发展历程

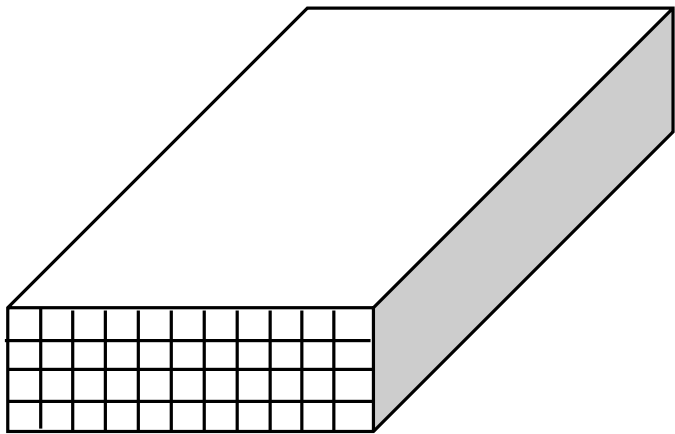


算法原理: “**R**esistivity **A**daption **A**lgorithm” 电阻率变化法(RAA): 利用一组电阻率不同的常规导体组合在瞬态下的磁场扩散过程模拟超导体磁场穿透过程

求解方法: 超导体穿透过程简化为非线性方程组的数学求解问题, 利用超松弛优化算法求解

- GU et al, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.15, 2005. (2005年提出算法)
- GU et al, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.23, 2013. (2013年完成了理论完备性证明)
- GU et al, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.24, 2014. (2014年完成 场路耦合计算范例)





$$J_1 = f_{11}(\rho_1) + f_{21}(\rho_2) + f_{31}(\rho_3) \dots$$

$$J_2 = f_{12}(\rho_1) + f_{22}(\rho_2) + f_{32}(\rho_3) \dots$$

$$J_3 = f_{13}(\rho_1) + f_{23}(\rho_2) + f_{33}(\rho_3) \dots$$

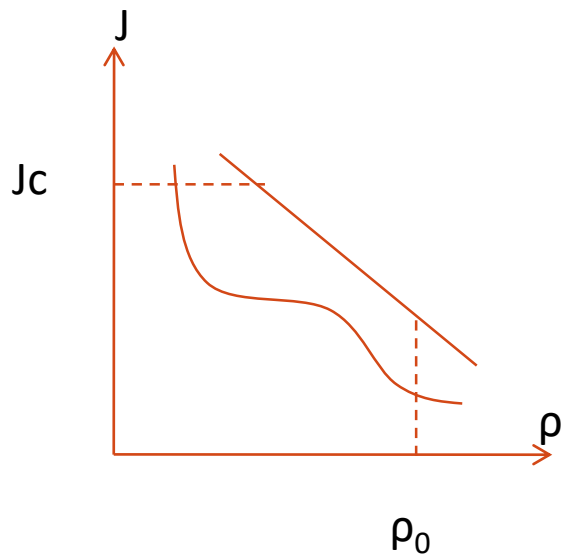
⋮

Power law

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + k(\sigma^*(J) - \sigma^n) \quad \sigma^* = \sigma_0 \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1}$$

CSM

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + k \frac{(J - J_c)}{J_c} \sigma^n$$

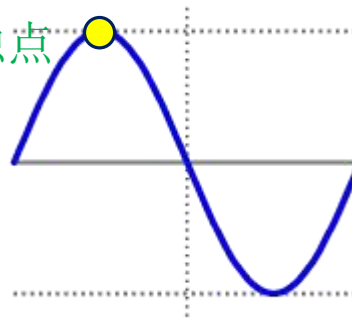


Equations behind AC loss calculation

For Bean model

仅需知道单独点

$$Q(I_m) = 4 \int_S J(x, y) \psi(x, y) dS$$

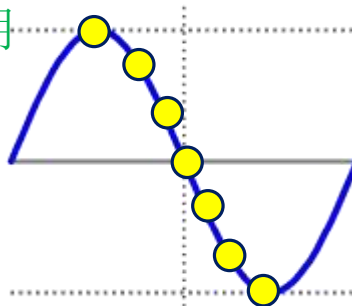


For Kim model

需要1/2周期

$$Q = \int dt \int J(x, y; t) E(x, y; t) dx dy$$

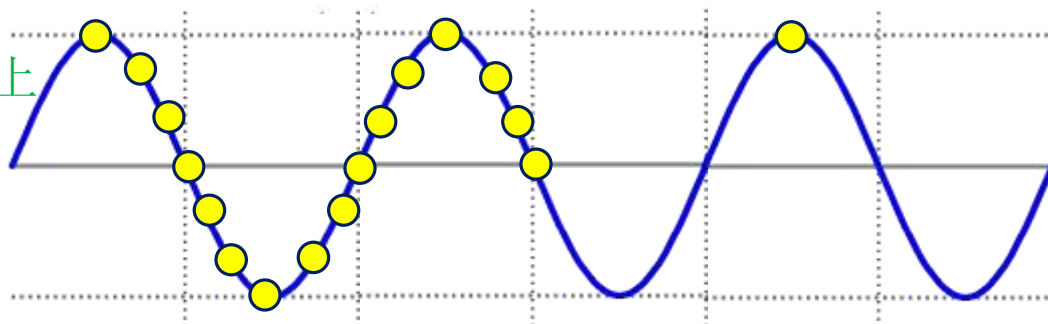
$$Q = 2 \int_{-I_m}^{I_m} dI \int_S J(x, y; I) [\partial_I A(x_0, y_0; I) - \partial_I A(x, y; I)] dx dy$$



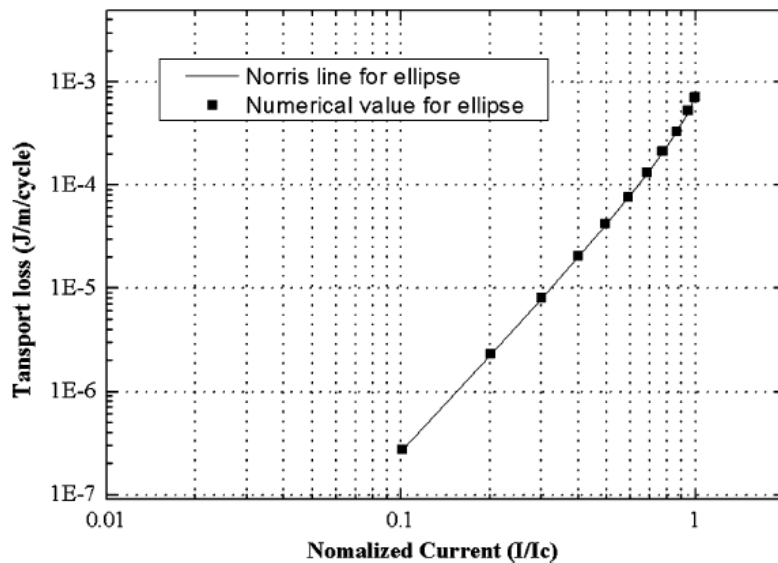
For E-J power law

3周期或者以上

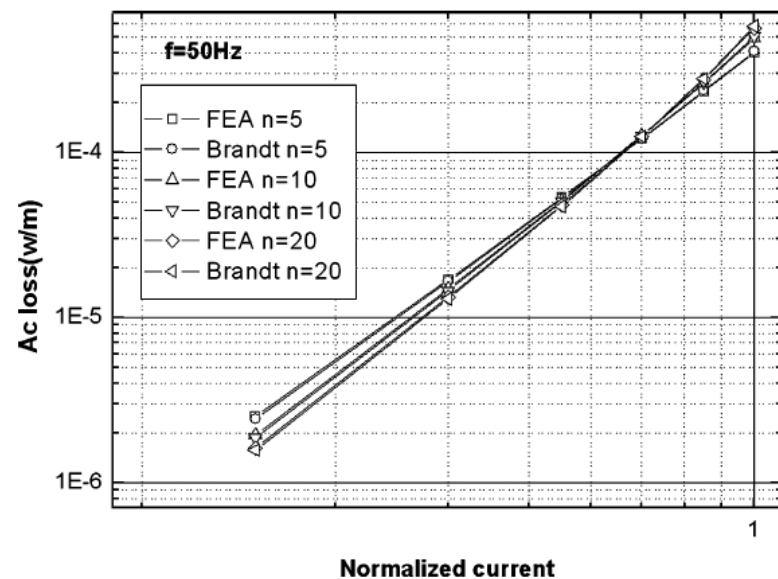
$$Q = \int dt \int J(x, y; t) E(x, y; t) dx dy$$



电磁场计算基础——计算精度确认



Compared with Norris curve(CSM), error less than 1%.



Compared with Brandt method(E-J), discrepancy less than 1%.

1. W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets," J. Phys. D, vol. 3, pp. 489–507, 1970.
2. E. H. Brandt, "Susceptibility of superconductor disks and rings with and without flux creep," *Phys. Rev. B*, vol. 55, no. 21, pp. 14 513–14 526, Aug. 1996.

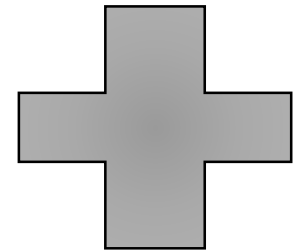
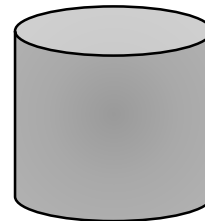
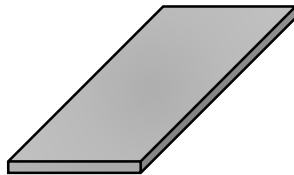
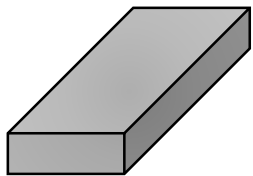


Dr. Ernst Helmut Brandt

@Max-Planck Institute, Germany

September 17, 1941----- September 1, 2011

Helmut's theoretical work has always been concerned with the Abrikosov vortex lattice in type-II superconductors, particularly with the ideal lattice, its nonlocal elastic response, lattice defects, pinning, and effects of geometry on the electromagnetic response of superconductors.





电磁场计算基础——算法对比

单位	基于算法	适用性	特点	使用和地区
英国剑桥	H-formula	E-J Power law 依托 COMSOL平台	开放性比较强	欧洲，美国，亚洲
日本横滨大学	T- Ω formula	E-J Power 自编平台	封闭	日本
德国KIT	H-formula	E-J Power law	开放性比较强	欧洲，美国
斯洛伐克电工所	最小能量法	临界态； 自编平台	封闭	欧洲
中国清华大学	RAA算法 A- Φ	兼容E-J Power law 与临界态依托ANSYS 平台	开放性比较强	欧洲，美国，亚洲

RAA以其良好的就项目组是全世界**对外开放**，实现参数化交流损耗计算的平台，是构建超导科研共享生态环境的可贵尝试

电磁场计算基础——RAA算法



Four major numerical approaches, featuring different equations, have been developed so far: the A-V formulation, based on the magnetic vector potential [5]; the T-Ω formulation, based on the current vector potential [6]; the H-formulation, based on the magnetic field [7–9]; and the Adaptive Resistive Algorithm (ARA) [10–12]. Further to FEM also calculation based on Variational Principles have been shown to be very powerful in several situations [13–16].

意大利著名学者S.Farinon 2017文章罗列了主流磁通穿透算法分为：
A-V；T-Ω；H-formular；RAA。其中RAA为本项目最早提出

- 2010年 [10] Farinon S, Fabbriatore P, Gomory F. Critical state and magnetization loss in multifilamentary superconducting wire solved through the commercial finite element code ANSYS. Supercond Sci Technol 2010;23:115004.
- 2010年 [11] Farinon S, Fabbriatore P, Grilli F, Krüger PAC. Applicability of the adaptive resistivity method to describe the critical state of complex superconducting systems. J Supercond Novel Magnetism 2012;25(7):2243–350.
- 2005年 [12] Chen G, Zhenghe H. Calculation of AC losses in HTS tape with FEA program ANSYS. IEEE Trans Appl Supercond 2005;15:2859.

电磁场计算基础——RAA算法可以做的事情

实现基于RAA法的磁体“磁通穿透-电磁-热传导”计算

完成带材、磁体、场路耦合交流损耗计算方法

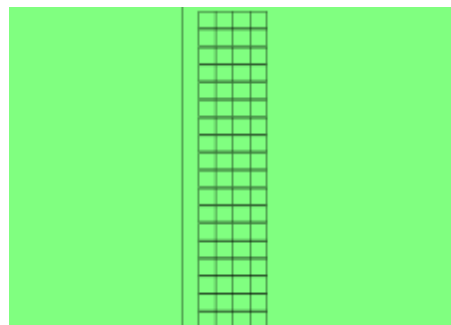
带材级仿真



带材磁通穿透及交流损耗
仿真

基本物理图像建立

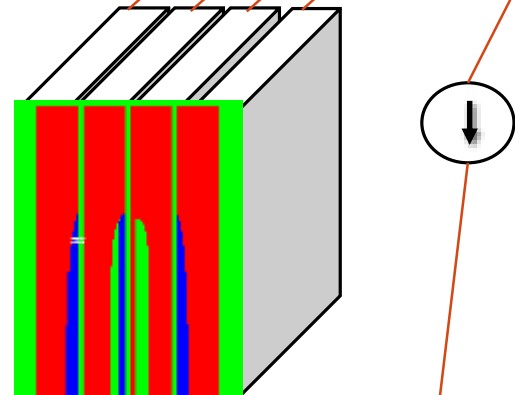
磁体级仿真



磁体磁通穿透及交流损耗
仿真

匀强磁体, MRI, 加速器应用

场路耦合级仿真



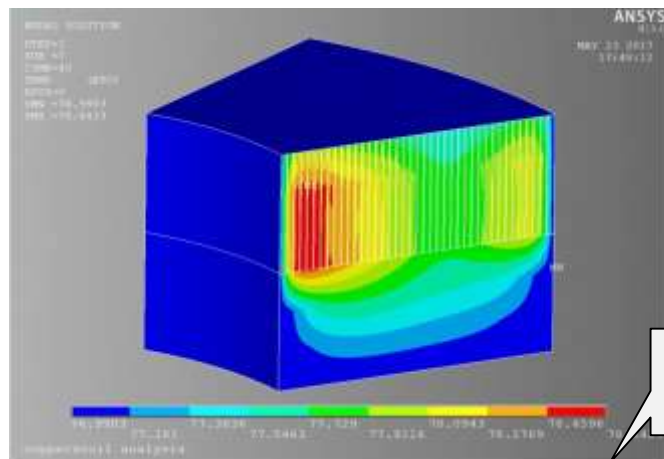
限流器, SMES应用

为揭示超导磁通微观运动机制, 加速器匀强磁体设计, 超导电力应用的全面研发提供支持

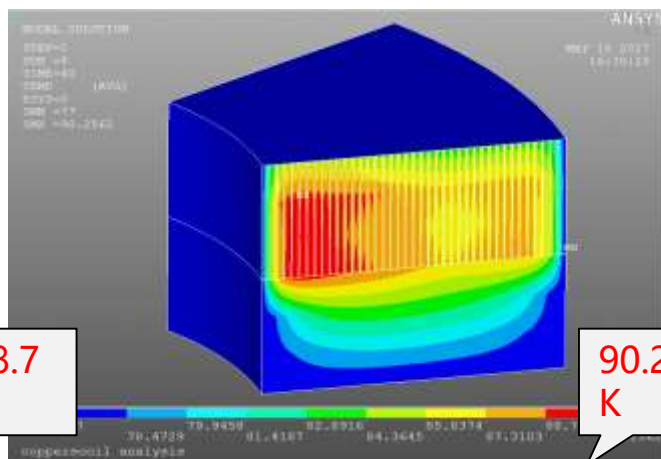
电磁场计算基础——线圈“交流”损耗热学仿真模型

高温超导线圈动态热稳定性仿真

对大型圆形超导线圈在不同大小工作电流下的动态热稳定性进行分析



30A-50Hz-40匝线圈交流损耗下的热分布

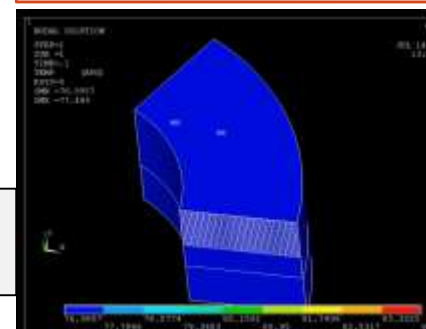


60A-50Hz-40匝线圈交流损耗下的热分布

由仿真结果可知，仿真模型几何特征下的40匝超导线圈工作在30A时局部温升只有1.7K，而工作在60A时温升将高达13K以上，**超出线圈安全工作的温度区间，作为电工用线圈设计依据。**

RAA算法得到的损耗结果输入热学仿真

每匝建模，考虑界面，材质等复杂物理因素



线圈局部发热点热传播过程，模拟quench传播过程



应用情况

技术应用1：“互联网+”损耗计算平台开放

磁体交流损耗仿真软件
RAA Resistivity Adaption Algorithm





软件输入输出界面

电流输入参数 *

加载电流值 (A)

加载电流频率 (Hz)

带材参数 *

带材宽度 (mm)

带材厚度 (mm)

绝缘层厚度 (mm)

互联网接口



本项目组封装成可视化软件，利用网站发布，网址<http://www.eastfs.com/ctjshfzfw>，该软件是世界上**首个对外**开放仅需设置磁体几何参数和带材参数，就可以准确得到磁体每匝交流损耗的软件。可以从微观磁通运动深刻理解损耗生成机制，判断电力设备动态稳定特性，经济运行特性。国内外10余家单位20例计算请求。

应用情况



Please click here to complete the questionnaire for program download links.
请点击这里完成问卷获取程序下载链接。

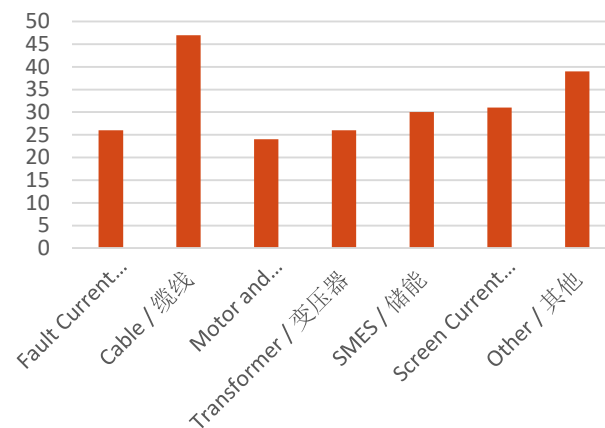
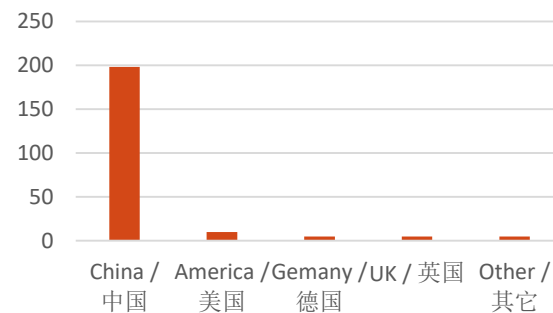
Instructions for the use of RAA programs/RAA程序使用说明:

	what is RAA20190325-1.pdf	2019-03-26
855.11 KB		
	How to use RAA-20190325.pdf	2019-03-26
600.7 KB		

Number of current downloads/当前下载人数: 35

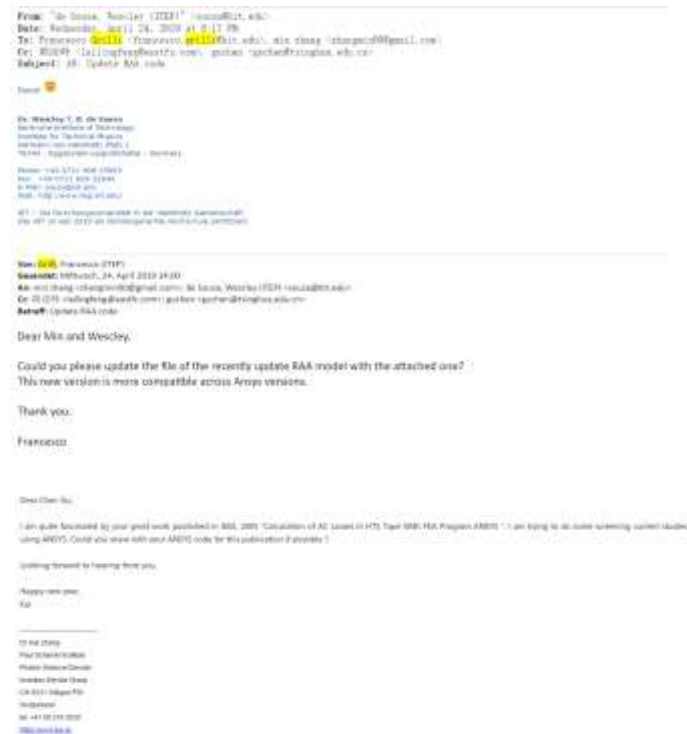
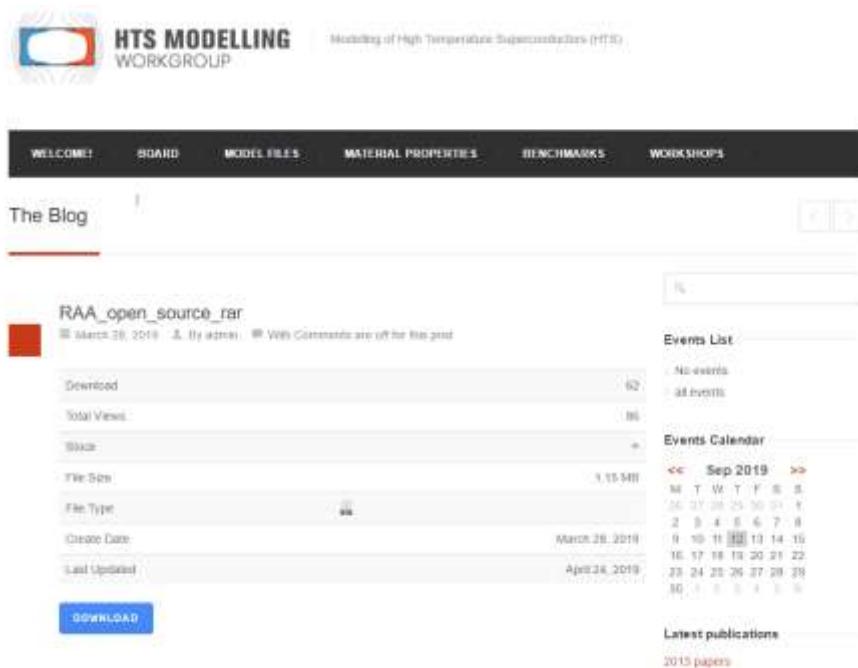
Update time/更新时间: 2019.3.27

Statistics about downloads/下载统计:



总计1000多行程序，利用互联网平台<http://www.eastfs.com/raacxxz>分享程序总计**400**多例下载，并开展多种形式的免费培训

应用情况

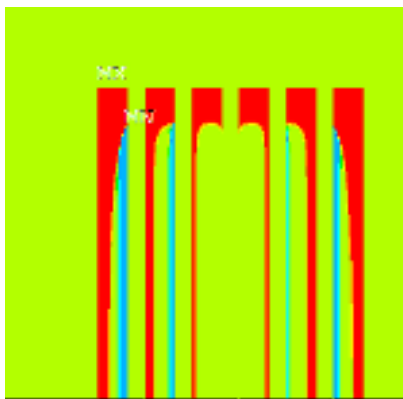
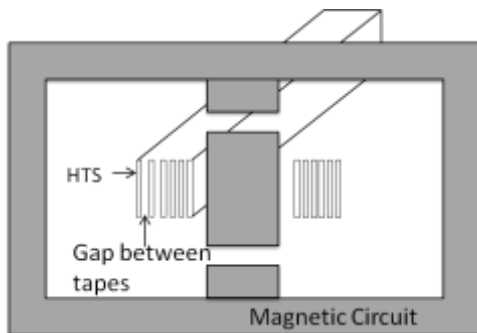


为了方便国外同行下载，RAA软件现在可以通过HTS Modelling <http://www.htsmodelling.com/> 网站下载（该网站由国际著名超导仿真专家德国KIT大学Grilli开创），现在已有62例下载。

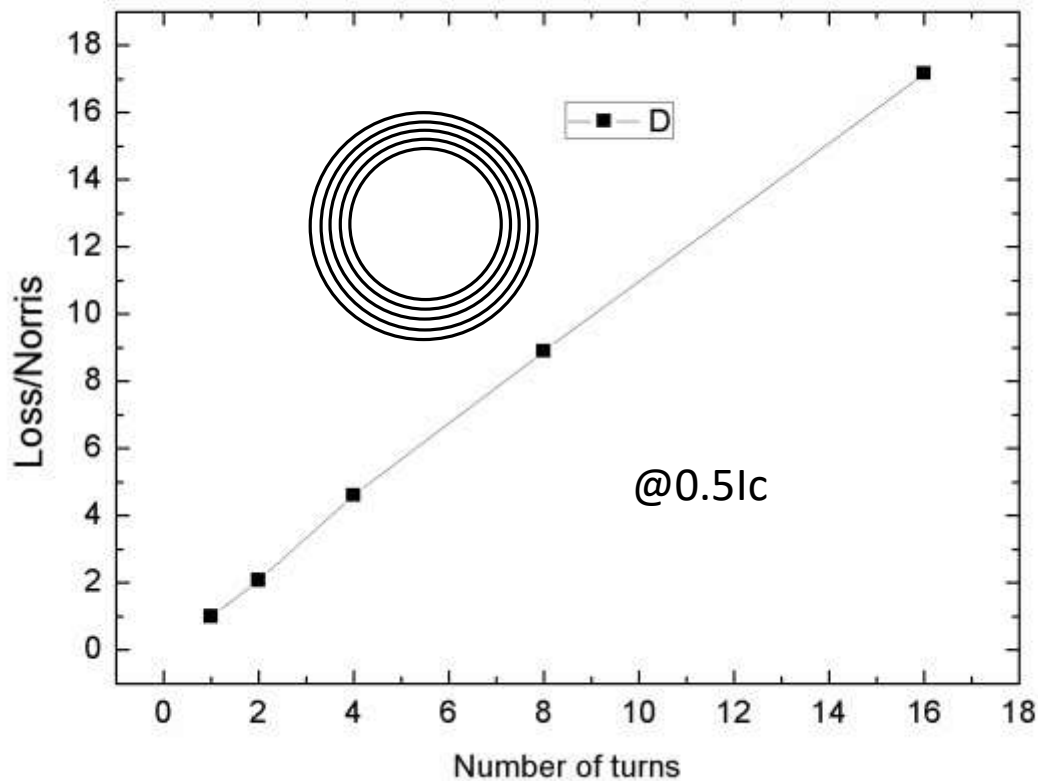
内容概要：

1. 研究交流损耗为什么至关重要
2. 磁通运动模型
3. 电磁仿真技术基础
4. 线圈交流损耗基本行为

线圈交流损耗的一般行为-多匝

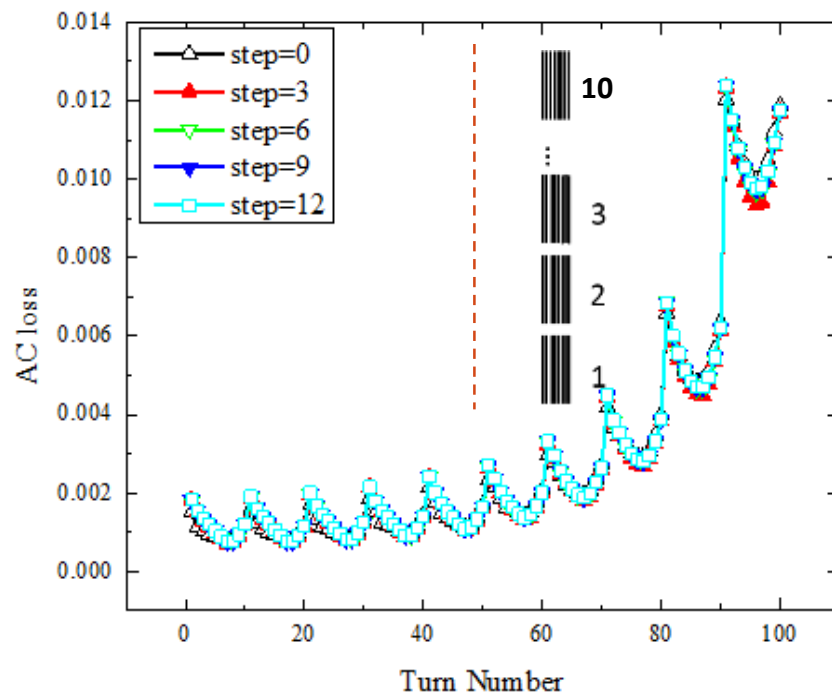
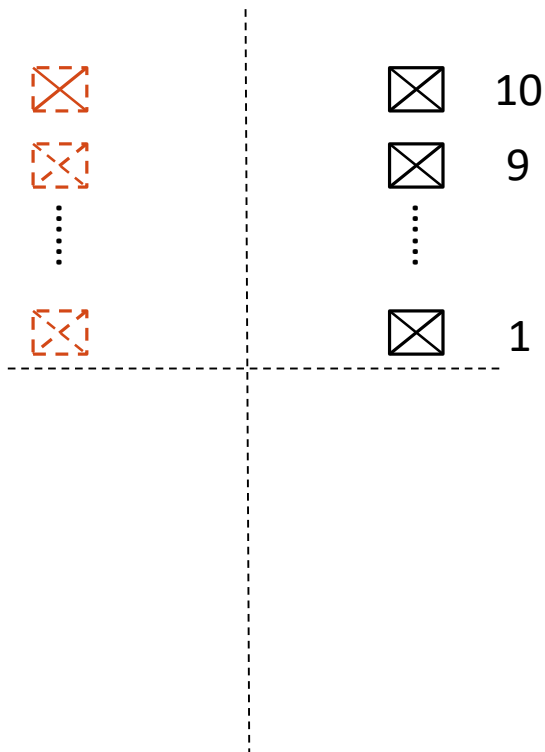


线匝密排，呈现强烈的磁耦合



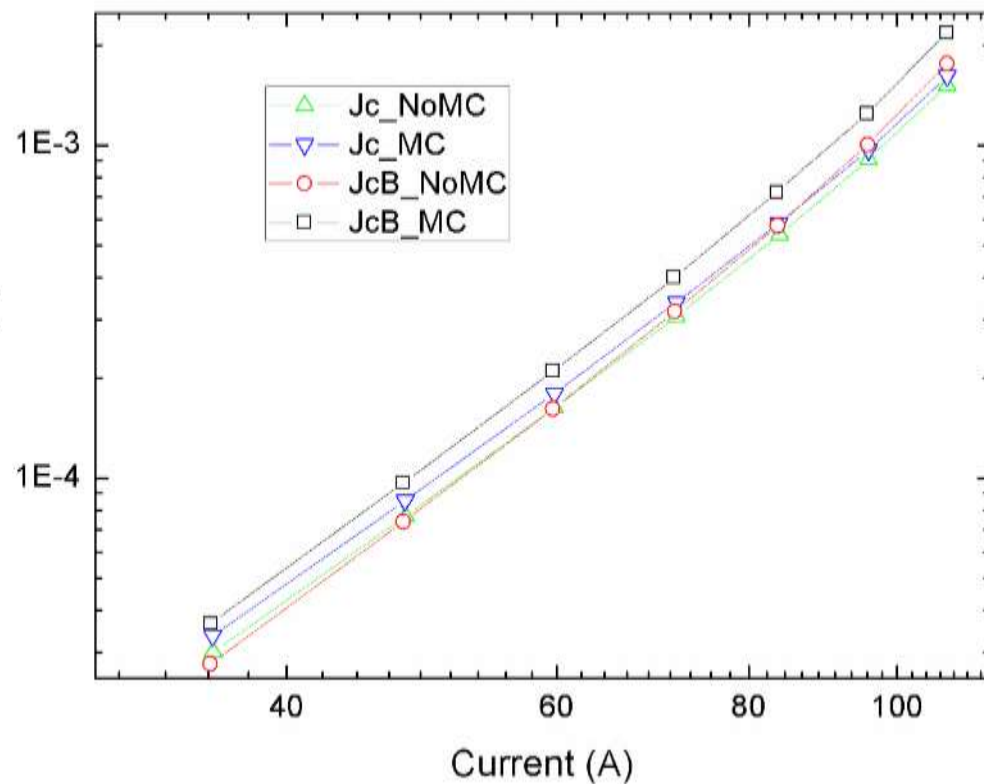
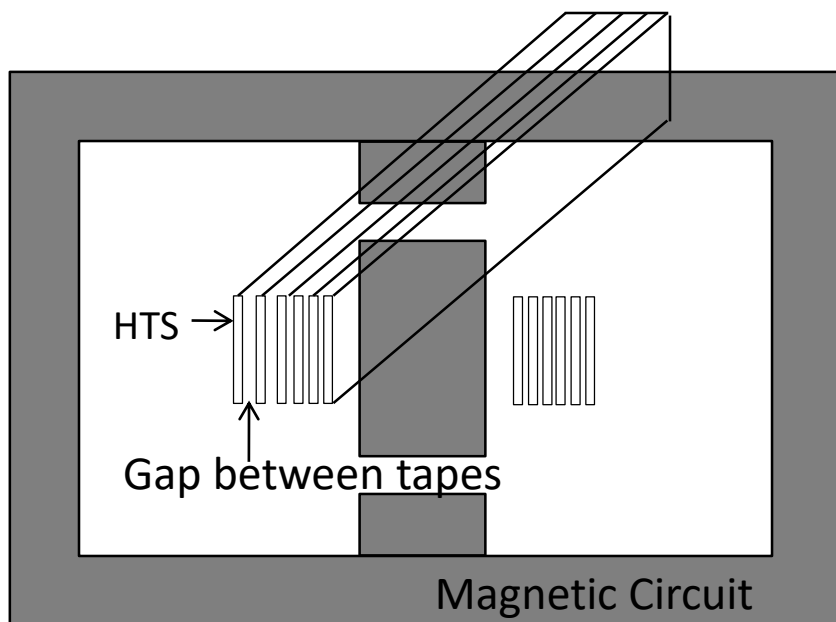
单位长度交流损耗随匝数增加呈线性增加趋势，但随着匝数进一步增加饱和

线圈交流损耗的一般行为-多匝多饼



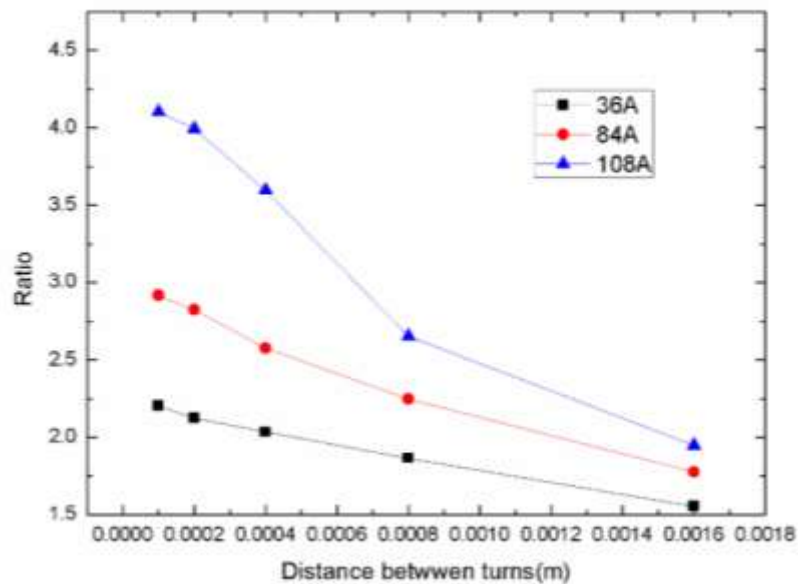
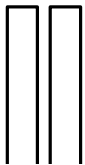
多饼线圈最外饼交流损耗远大于最内饼。外侧匝损耗大于中部匝损耗

线圈交流损耗的一般行为-含磁路线圈

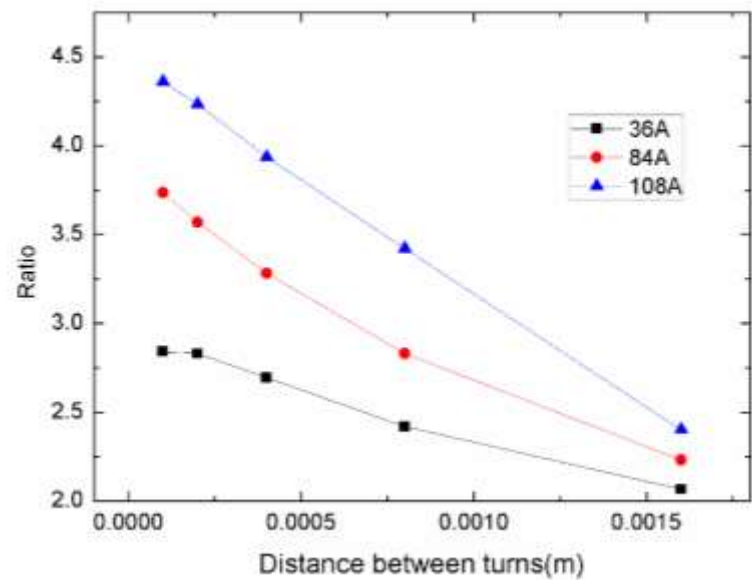


1. $J_c(B)$ 特性对于模拟交流损耗至关重要
2. 磁路下，线圈交流损耗比无磁路大30%。

线圈交流损耗的一般行为-匝间距



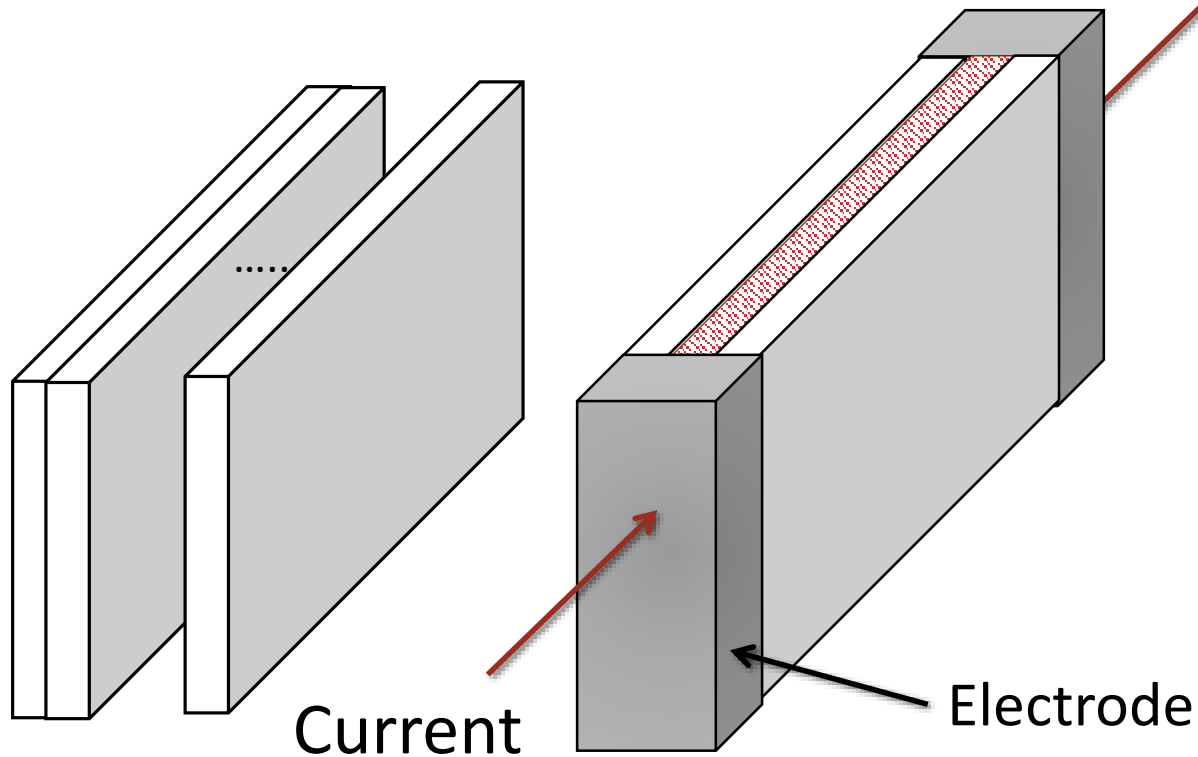
不含磁路线圈交流损耗



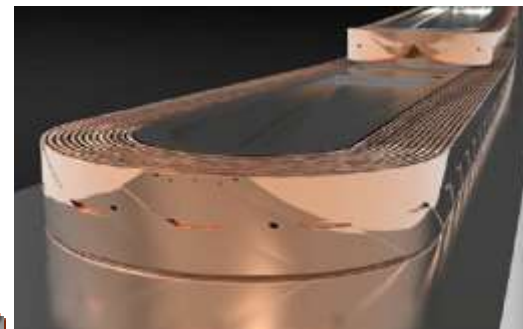
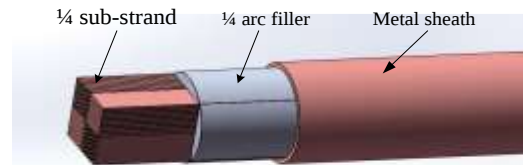
含磁路线圈交流损耗

损耗随匝间距增加而减小，磁路的引入会阻碍解耦过程。

线圈交流损耗的一般行为-并联结构



More than two tapes are parallel connected and share common electrodes. Basic unit of conductors



线圈交流损耗的一般行为-并联导体

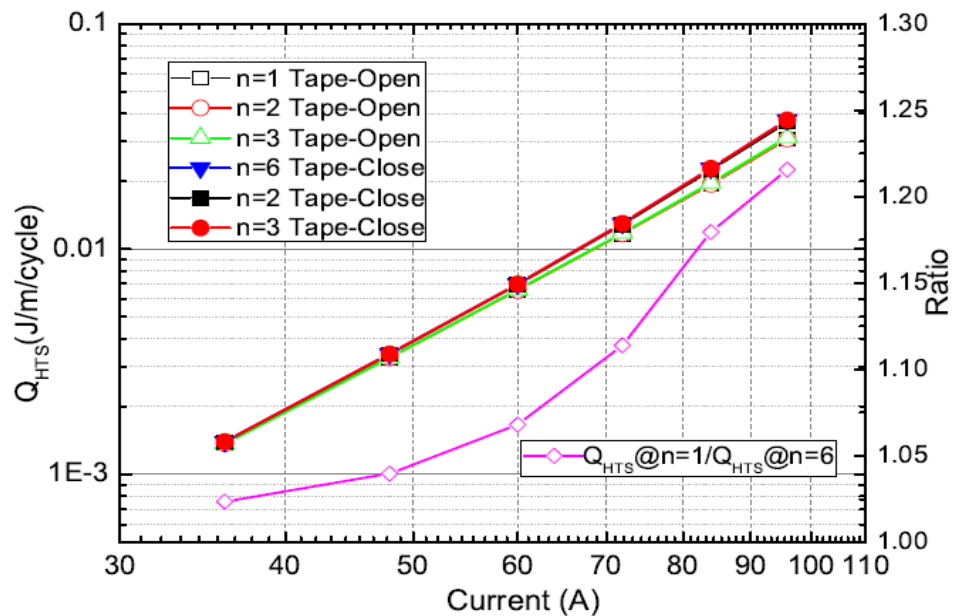
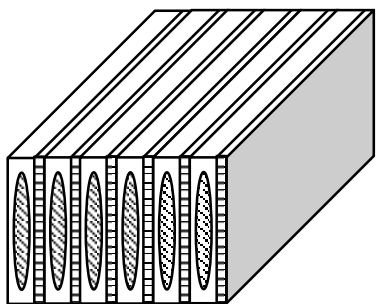
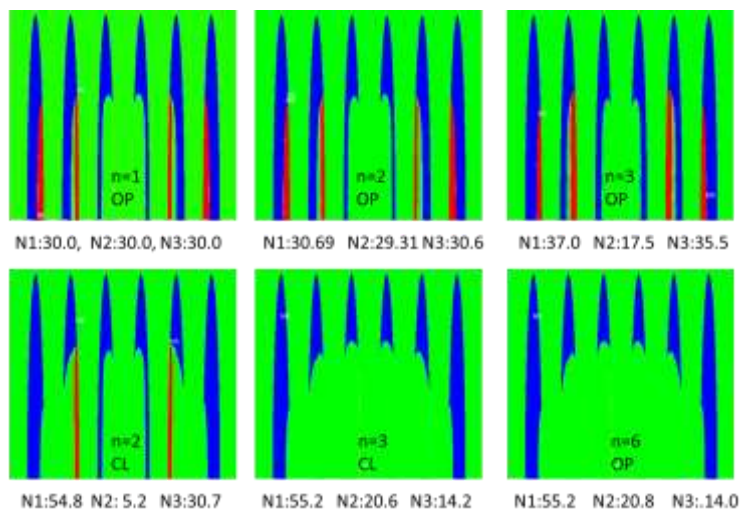


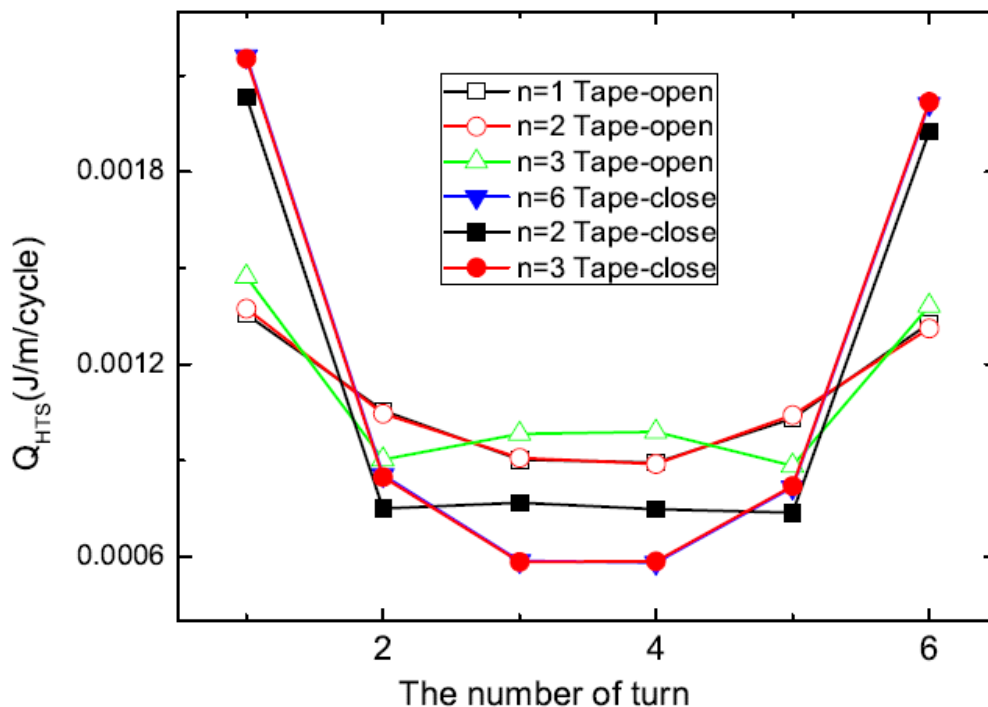
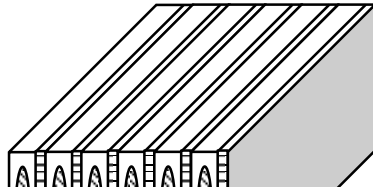
Fig.1. Q_{HTS} with different n values.

利用“场-路”耦合分析不同并联结构绕组，并联结构总体交流损耗增加不明显，但电流集中分布在最外侧应特别重视。

●GU et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.24, 2014. (2014年完成 场路耦合计算范例)

线圈交流损耗的一般行为-并联导体

@ $I_m/I_c=0.5$



Qhts in each turn of the winding with different n values and different end state.

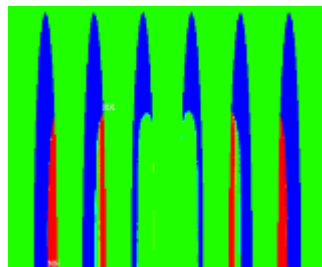
Regardless of the n value, the outer turns will have larger AC loss and the inner turns will have smaller AC loss.

The most uniform loss distribution within turns produces the smallest QHTS of the winding as a whole.

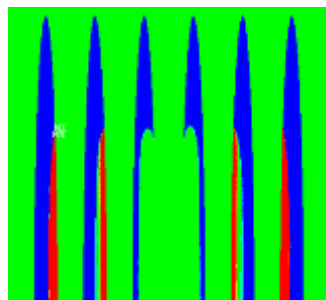
The increase in the total QHTS for tape-close state is acceptable. The AC loss is intensively focused on the outer tapes, which should be given a particular attention



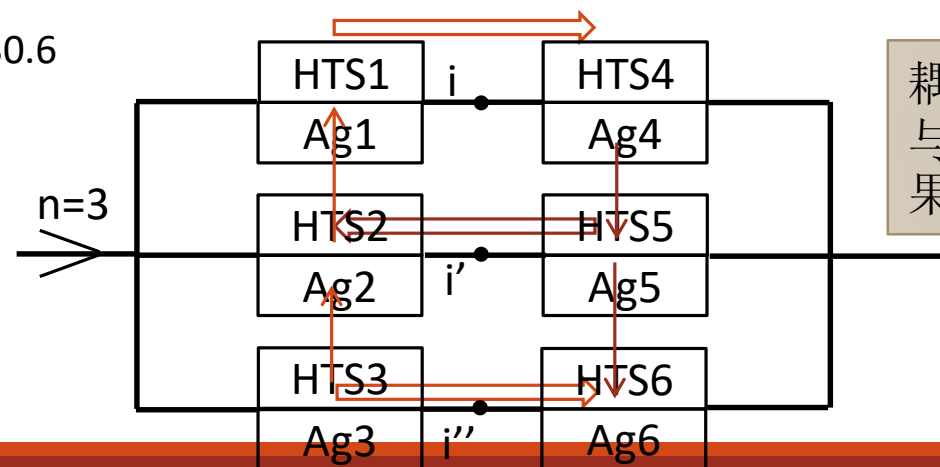
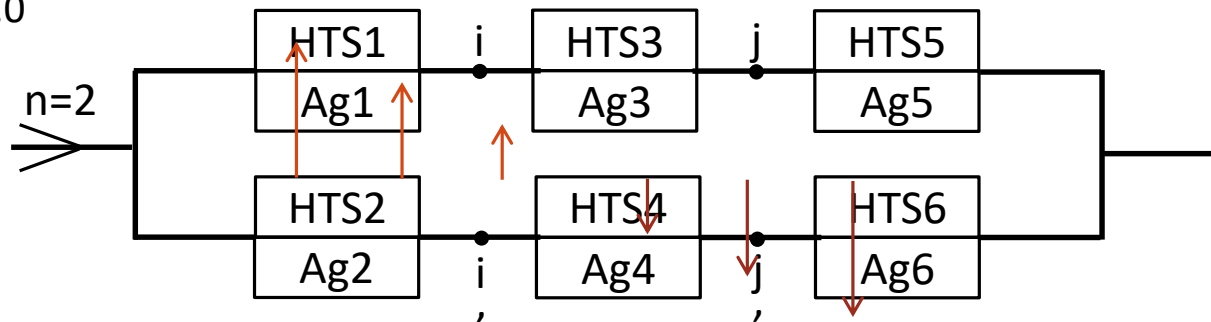
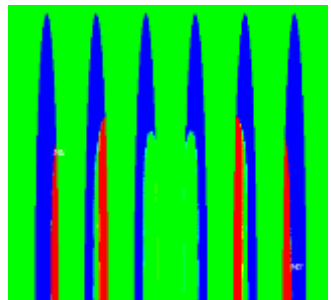
线圈交流损耗的一般行为-并联导体耦合损耗



N1:30.0, N2:30.0, N3:30.0



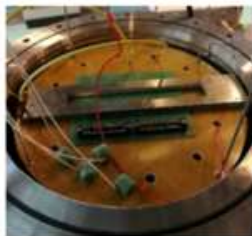
N1:30.69 N2:29.31 N3:30.6



耦合损耗是接触电阻与频率的共同作用结果

关键技术2 ——2.1研发高温超导交流损耗检测装置

SCMT、MACF型高温超导交流损耗测试装置



超导交流测试平台提供:

- 基于电测法的高温超导带材, 高温超导线传输交流损耗, 交流磁化率, 以及 **AC+AC激励** 条件下的损耗测试系统与服务。
- 基于电测法与量热法的线圈传输交流损耗

性能指标	参数	备注
频率范围 (Hz)	10~1000	
频率分辨率 (Hz)	0.1	
传输电流范围 (A)	0~1000	
电流分辨率 (A)	0.1	
背景磁场范围 (T)	0~0.1	相位分辨率1°
背景磁场分辨率 (T)	1E-3	
背景磁场频率 (Hz)	10~1000	
背景磁场频率分辨率 (Hz)	0.1	
磁场角度范围	0°/90°	
电测法传输交流损耗分辨率 (W)	1E-5	
磁化率交流损耗分辨率 (W)	1E-4	
热测法交流损耗分辨率 (W)	0.1	
待测样品种类	单带/线圈/磁体	

关键技术难点:

1. 突破了AC+AC激励条件下, 采集线圈与采集电路的二级补偿
2. 解决了AC+AC条件下的相位同步锁定技术
3. 解决了系列强电磁耦合条件下电磁兼容性问题
4. 非金属无磁杜瓦, 热损耗标定技术等

核心部件-高精度数据采集卡

关键点1：研制开发WIFI传输高精度数据采集。替代传统锁相，实现数据锁相的技术。

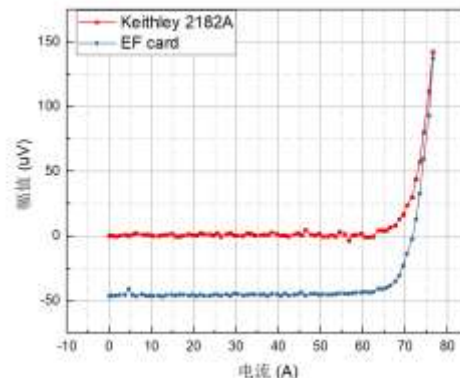


1. 电池供电，最大限度的抑制工频噪音。
2. 采用波形积分测试技术。避免电感抵消和滤波
3. 拓展潜力大，将应用在调相机，磁悬浮等

类别	EF-721	EF-621	EF-521
采样频率 (Hz)	10000 / 1000 / 500 / 100 / 10		
通道数量	(差分) 24 / 16路 同步测量	(差分) 24 / 16路 同步测量	(差分) 8路 同步测量
分辨率	24 位	16 位	16 位
精度	0.03% FSR + 3 μ V @ 100Hz		
耐冲击 (瞬时)	30 V, 200 ms		
量程 (V)	± 5 (可定制)		
增益	1 / 2 / 4 / 8		
通讯方式	无线Wifi / 有线网口		
供电方式	锂电池供电 (5000 mAh, 使用5小时, 可充电) / 外部适配器供电		
IO功能	有		
恒流输出 (mA)	4-20	无	无
多台组网使用功能	有		
高压隔离模块耐压 (V)	1000 RMS		



运动测试



Ic对比测试

其核心是EF数据采集卡，具有高精度、无线传输、耐高压特点，将应用在高速超导调相机项目上。

谢谢
Thanks
恳请指导！