

CR 超导二极铁导线的 3D 有限元失超模拟*

吴巍^{1,2;1)} 何源¹ 马力祯¹ 李青^{1,2} 姚庆高^{1,2} 卞文龙^{1,2} 夏佳文¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 利用 FEM 软件 ANSYS 对德国 GSI 的 FAIR 项目的超导二极铁的超导导线进行了失超模拟. 该模拟形象地给出导线的失超过程, 通过 APDL 编程可以得到失超传播速度, 失超时导体的端电压随时间的变化. 文章还进一步研究了导线的最小失超传播区域 MPZ, 失超段初始温度和电流对失超传播速度的影响.

关键词 CR 超导二极铁 失超模拟 ANSYS FEM APDL 失超传播速度

1 引言

超导磁体储能巨大, 一旦失超, 释放出的巨大热量对于磁体是非常危险的^[1], 所以, 如果能够对磁体的失超性能有一个较为准确的预见, 就可以为超导磁体的设计提供一个可靠的依据来选择合理的安全系数.

利用通用有限元计算程序 ANSYS 对德国 FAIR 项目的 CR 超导二极铁的超导导线进行了失超模拟, 得到了导体的失超性能参数, 为磁体设计提供参考.

2 ANSYS 失超模拟方法

利用 ANSYS 的热分析模块来模拟失超的瞬态传热过程, 而失超过程中的电学现象则利用 ANSYS 脚本语言 APDL 程序来实现^[2]. 程序流程如图 1 所示.

程序首先建立超导体的几何模型, 采用 solid70 单元进行网格划分并加载材料性质. 然后初始化导体温度为 4.5K, 导体的一小段的初始温度则设定为高于临界温度的一个值来造成失超.

初始时间步求解结束后, 程序读取节点温度, 计算出该节点的生热率并加载. 然后程序再次调用 ANSYS 求解器进行第二时间步的计算, ANSYS 在计算过程中会采用更小的子时间步来提高计算精度. 计算出一个新的温度分布后, 程序读取节点温度并重新计算和加载节点生热率, 然后进入 ANSYS 求解器进行新的时间步的计算, 如此反复, 直到总时间达到预设值, 循环求解结束, 进入后处理阶段.

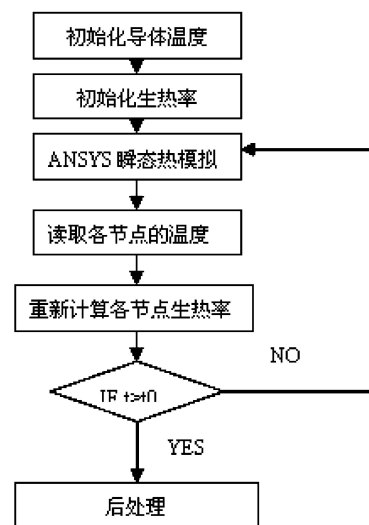


图 1 程序流程

3 CR 超导二极铁导体的失超模型的建立

3.1 CR 超导二极铁试验线圈参数

为了研究 CR 磁体线圈的实际性能, 专门绕制了一个试验线圈进行性能测试, 试验线圈的运行参数见表 1.

表 1 试验线圈运行参数

最高磁场/T	工作电流/A	电感/H
1(计算值)	242	1.19

2008 - 01 - 07 收稿

* 中国科学院近代物理研究所所长基金(0615010SZO), 中国科学院西部之光人才培养项目(0715060XLO)和国家自然科学基金(10635090)资助

1) E-mail: wuwe@impcas.ac.cn

3.2 CR 超导二极铁用超导线主要参数^[3]

(1) 单根超导线的截面见图 2.

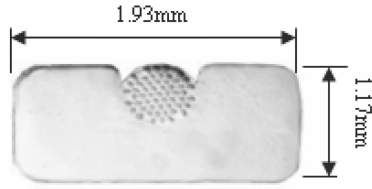


图 2 导线截面

(2) 导线的基本参数见表 2.

表 2 导线的基本参数

导线尺寸/mm	铜超比 $\beta(\text{Cu}/\text{Sc})$	RRR 值
1.17 × 1.93	14	132

(3) 超导线的临界参数如下

表 3 导线的临界参数

$T_c(B)/\text{K}$	T_{cs}/K	$J_{c0}(B)/(\text{A}/\text{m}^2)$
7.5	6.3	9.33×10^9

(4) 超导线的材料

由式(1)得到超导线的比热, 由式(2)可得超导线的热导率, 而 Cu 和 NbTi 的比热和导热率都是随温度变化的,

$$C_{p\text{cond}} = \frac{\beta \cdot C_{p\text{Cu}} + C_{p\text{NbTi}}}{1 + \beta}, \quad (1)$$

$$K_{\text{cond}} = \frac{\beta K_{\text{Cu}}}{1 + \beta}. \quad (2)$$

(5) 导线电阻率

超导线温度 T 低于分流温度 T_{cs} 时, 处于零电阻状态, 设定一个小值: $1 \times 10^{-16} \Omega \cdot \text{m}$. 当温度高于临界温度 T_{cB} 时, 所以导线电阻率为

$$\rho_{\text{cond}} = \frac{(\beta + 1) \cdot \rho_{\text{Cu}}}{\beta}, \quad (3)$$

其中 ρ_{Cu} 为 RRR 值为 132 的铜在 1T 时的电阻率.

当 $T_{cs} < T < T_{cB}$ 时, 采用线性近似(图 3):

$$\rho_{\text{cond}}(T) = \frac{T - T_{cs}}{T_{cB} - T_{cs}} \rho_{\text{cond}}(T_{cB}). \quad (4)$$

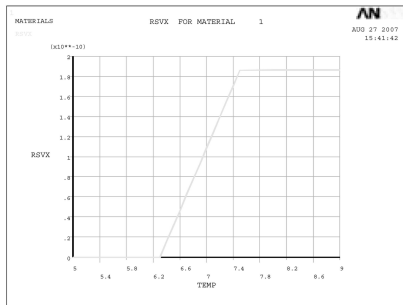


图 3 导线电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$) (分流段线性近似)

3.3 模型的基本假设

本文对单根导线的初始失超过程进行模拟, 因而采用以下基本假设:

- 电流恒定, $I = 242 \text{A}$;
- 磁场不变, $B = 1 \text{T}$;
- 边界条件近似为绝热状态.

4 模拟结果及讨论

4.1 初步模拟结果

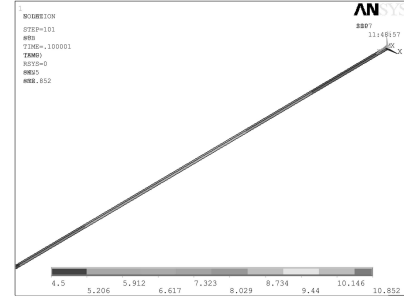


图 4 $t = 100 \text{ms}$ 时温度分布云图

采用以上的基本假设和基本参数对 CR 导体进行 ANSYS 失超模拟, 设定模拟时间为 200ms, 时间步长为 1ms, 初始失超段长度为 50mm, 初始温度为 9.2K. 图 5 为失超开始后 100ms 时导体上的温度分布云图.

进一步编写程序进行后处理, 可以得到各个时间沿导体的温度分布, 见图 5.

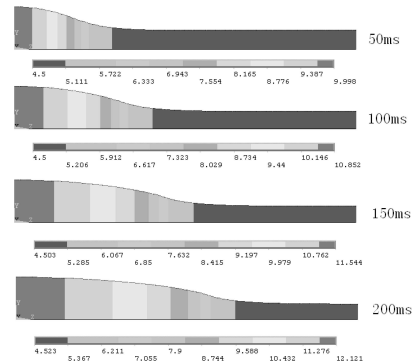


图 5 失超后各时间导体温度分布

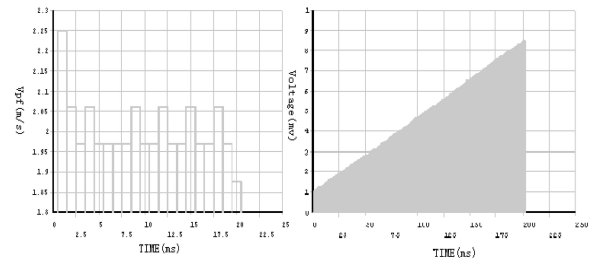


图 6 (a) 失超传播速度; (b) 导体端电压

失超传播速度是衡量超导磁体失超传播特性最为重要的参数之一. 通过 ANSYS APDL 编程, 可以得到失超传播速度随时间的变化图 6(a).

同样可以得到导体端电压随时间的变化曲线(图 6(b)). 可以看出导体电压呈线性增长, 200ms 时为 8mV 左右.

4.2 导体失超性能参数研究

1) 最小失超传播区长度

最小失超传播区, 即 MPZ(Minimum Propagation Zone), 是指能够开始造成失超传播的最小的初始失超区域. 这个参数是衡量超导线稳定性的重要参数.

将初始失超段温度设置为分流温度 T_{CS} , 通过改变初始失超段的长度, 看导线是否失超, 从而找出最小失超传播区域的长度. 模拟结果见表 4.

表 4 失超传播区模拟结果

L/mm	10	20	25	25.5	26	28	30
$V_{pf}/(m/s)$	0	0	0	2.01	2.02	2.1	2.01

从表中的结果可以推断最小失超传播区 (MPZ) 的长度约为 25.5mm.

2) 导体失超段初始温度对失超传播速度的影响

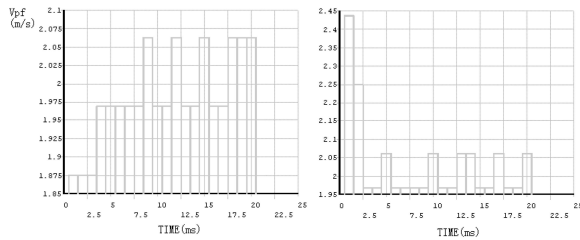


图 7 (a) $T_0=8$ K; (b) $T_0=10$ K

采用不同的加热段初始温度来造成失超, 从而研究不同初始温度下失超传播行为的不同. 从模拟结果(图 7(a))可以看出当失超段初始温度较小时 ($T_0 = 8K$), 失超传播有一个加速过程, 从刚开始的

1.8m/s 加速到 2m/s 后达到稳定速度; 而当失超段初始温度较大时 ($T_0 = 10K$), 见图 7(b), 失超传播有一个减速并趋于稳定的过程, 从开始的 2.4m/s 减速到 2m/s.

还可以看出, 虽然初始温度不同, 但是两个失超过程达到稳定后的失超传播速度是一致的.

3) 运行电流对失超传播的影响

改变导线的运行电流, 可以得到失超传播速度与电流的关系曲线(图 8). 可以看出, 失超传播速度随导体运行电流地增大而线性增长.

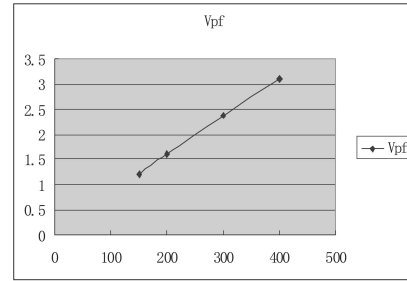


图 8 电流和失超传播速度的关系

5 结论

上述的模拟结果表明: 1) 该导体在工作电流为 242A, 磁场为 1T, 失超段初始温度为分流温度时最小失超传播区为 25.5mm; 2) 加热段初始温度只影响达到稳定失超传播之前的失超传播行为, 不同的初始温度造成的失超的稳定的传播速度是相同的; 3) 该导体在工作电流为 242A, 磁场为 1T 时失超传播速度为 2m/s; 4) 失超传播速度和热点温度随运行电流的增加呈线性增长.

参考文献(References)

- 1 Wilson M N. Superconducting Magnets, 1983, Clarendon Press Oxford
- 2 Marscin E, Yamada R, Lee A. 2D/3D ANSYS Quench Simulation Manual, July 30, 2002. Fermilab Internal Report
- 3 Floch E. Protection Scheme of the CR Dipole, 19.03. 2007

3D Quench Simulation Using Finite Element Method for CR Superconducting Magnet's Strand^{*}

WU Wei^{1,2;1)} HE Yuan¹ MA Li-Zhen¹ LI Qing^{1,2} YAO Qing-Gao^{1,2}
BIAN Wen-Long^{1,2} XIA Jia-Wen¹

1(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The CR superconducting magnet is a dipole of the FAIR project of GSI in Germany. The quench of the strand is simulated using FEM software ANSYS. From the simulation, the quench propagation can be visualized. Programming with APDL, the value of propagation velocity of normal zone is calculated. Also the voltage increasing over time of the strand is computed and pictured. Furthermore, the Minimum Propagation Zone (MPZ) is studied. At last, the relation between the current and the propagation velocity of normal zone, and the influence of initial temperature on quench propagation are studied.

Key words CR superconducting magnet, quench simulation, ANSYS, FEM, APDL, propagation velocity of normal zone

Received 7 January 2008

^{*} Supported by Director Foundation of Institute of Modern Physics of CAS (0615010SZO) and Western Light Talents Training Program of CAS (0715060XLO) and NSFC (10635090)

1) E-mail: wuwei@impcas.ac.cn