

文章编号: 1673-3193(2006)01-0041-04

CICC 超导稳定性数值仿真计算研究

蒋华伟, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: Tokamak 核聚变装置要实现稳态运行, 需要靠超导磁体及导体的稳定性, 而 CICC(Cable-in-Conduit Conductor) 导体是低温超导磁体的首选磁体, 因此需要研究 CICC 在大电流和快速变化磁场环境下的低温稳定性. 针对这一目的, 首先研究了 CICC 的稳定性机理, 并对铌三锡超和铌钛超导材料给出经验设计公式; 然后编程对分流温度、温度裕度、能量裕度进行计算, 接着模拟出随运行电流变化的稳定性曲线, 并把结果保存到数据库. 同时对工程设计值和模拟分析及计算结果进行比较和分析, 二者基本吻合. 显然, 这为 CICC 设计提供了极大的方便.

关键词: 管内电缆导体(CICC); 能量裕度; 仿真计算

中图分类号: TP392; TP311.52 **文献标识码:** A

Primary Research on Numeric Simulative Computation of CICC Superconduction Stability

JIANG Hua-wei, WU Song-tao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 210031, China)

Abstract: Tokamak nuclear fusion device depends on superconductor magnet and its stability to keep the device steady. Nowadays, CICC is the first selected conductor for large cryogenic superconductor magnet; it is necessary to study the cryogenic operation stability of CICC under high current and in rapidly changing magnetic field. Aiming at the stability mechanism of CICC and after giving the experical design formula of some material, the paper gives calculation of sharing current temperature, temperature margin and energy margin, and draws simulation curve. Then, the result is saved into database. Finally, after compared the designed value with the result of simulation, almost the same conclusions are found. The research offers help to the design of CICC in the future.

Key words: cable-in-conduit conductor; energy margin; simulative computation

0 引 言

CICC 即管内电缆导体的简称, 又称管内铠装电缆超导体. 是在历经了法国的 Tore-Supra、日本的 TRIAM-1M 等热核聚变装置上超导磁体演变后推出的导体结构, 今天中国的国家大科学工程项目 EAST、印度的 SST1、韩国的 KSTAR 以及投资数 10 亿美元即将建造的 ITER 核聚变装置上都使用 CICC, 毫无疑问 CICC 以其优良的性能无可争辩地成为目前以及将来大型超导磁体的首选导体.

建造中的 EAST 和 SST1 磁体系统, 即 TF(Toroidal Field) 和 PF(Poloidal Field) 以及 CS(Center Solenoid) 的线圈均采用铌钛超导材料; 而 KSTAR 的 TF, CS 以及部分 PF 线圈采用铌三锡超导材料, 剩余的 PF 线圈采用铌钛超导材料; ITER 的 TF, CS 线圈采用铌三锡超导材料, PF 和 CC(Correction

* 收稿日期: 2005-05-30

基金项目: 国家大科学工程项目

作者简介: 蒋华伟(1970—), 男, 博士生. 主要从事网络与数据库研究.

Coil) 线圈采用铌钛超导材料. 是否采用铌三锡超导材料或铌钛超导材料, 要根据实际运行情况和其它条件而定, 同时权衡它们的临界值、价格以及机械性能等因素. 图 1 即为 EAST 超导磁体系统.

磁体系统的导体发展以 CICC 为代表方向. 它是有多级子缆合成的. 第一级子缆一般由数根铌三锡或铌钛股线组成, 为了增加导体的稳定性, 根据铌三锡或铌钛股线中的铜超比决定是否添加分离铜. 随后二、三等级的子缆分别由前面的子缆构成, 最后一级的形成要视实际情况而定是否需要中心冷却管. 然后用 0.1 mm 的不锈钢薄膜对最后一级进行叠包, 考虑到湿边周长和氦的渗透采用半叠包. 接着穿管再加工成设计需要的方形或圆形截面. 图 2 为 EAST 装置 TF 的 CICC 结构. 表 1 为 EAST 中 TF 线圈的 CICC 几何参数.

表 1 EAST 中 TF 的 CICC 几何参数

Tab.1 Geometrical Parameters of TF of EAST

电缆 4 级绞缆配置	(2sc+2Cu)345+1ccc
CICC 外形尺寸/mm ²	20.4×20.4
316LS.S 管壁厚/mm	1.5
CICC 内圆角半径/mm	2.0
CCC 缆芯直径/mm	~6.4
第三级子缆直径/mm	~9.1
最后一级子缆所包 S.S 钢带厚度/mm	0.1
最后一级子缆包 S.S 钢带后的直径/mm	21.0±0.1
UNK 超导股线直径/mm	0.87
超导股线表面厚度 Pb-Sn-Sb 厚度/μm	2~4
第一级子缆 Cu 股线的直径/mm	0.98
CCC 缆芯 Cu 股线的直径/mm	0.98
CICC 中含超导股线数	120
CICC 中含 Cu 股线数	120+21
最后要求 CICC 成品中 Cu 股的 RRR 值	>100

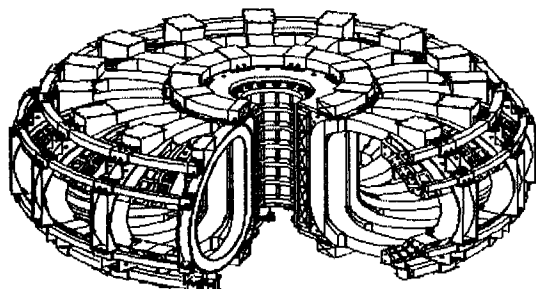


图 1 EAST 磁体系统

Fig.1 Magnetic system EAST

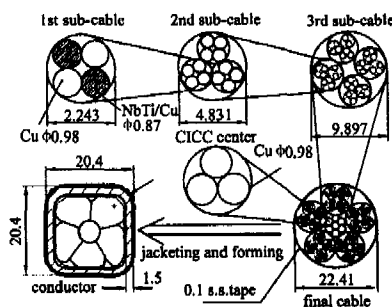


图 2 CICC 结构

Fig.2 Structure of CICC

1 CICC 稳定性

CICC 处在快速变化的电磁场中, 特别是在等离子体建立和破灭快速变化的电磁场过程, 导体将经受电磁场地快速变化并在导体中产生交流损耗. 同时由于焦耳热和其它热扰动, 以及 CICC 的机械移动即使是微小的位置变化, 也会严重影响 CICC 的稳定性. 鉴于此, 中科院等离子体所开展了国内大电流铌钛 CICC 和磁体低温稳定性机理研究, 提出了铌钛 CICC 和磁体的优化设计方法. 在设计时, 为了获得最大的稳定性裕度, 把导体工作电流选择在下极限电流附近. 最终成功地完成了含有分离纯铜股线作为超导稳定体的铌钛超导体和磁体的工程设计.

一般来说, 一旦 CICC 结构根据事先的运行条件确定后, 比如用于国家大科学工程 EAST 的 CICC 结构为 (2sc+2Cu)×3×4×5+1ccc(3×7), 那么超导、铜和氦的面积 A_{sc} , A_{Cu} 和 A_{He} 就随之而定, 也即各自的组分系数 f_{sc} , f_{Cu} 和 f_{He} 已成为定数. 这样就可以进行 CICC 稳定性的初步计算. 然后根据计算结果来反算验证下极限电流, 优化导体的参数等工作.

首先计算分流温度

$$T_{cs} = [T_{c(B)} - T_{op}](1 - I_{op}/I_c) + T_{op}, \quad (1)$$

然后是温度裕度, 即分流温度与运行温度的差为

$$\Delta T_s = (T_{cs} - T_{op}), \quad (2)$$

还有临界温度

$$T_{c(B)} = T_{c(0)}[1 - B_{c(T)}/B_{c(0)}]^b, \quad (3)$$

其中 $B_{c(0)}$ 是温度为 0 K 时的临界磁场; $T_{c(0)}$ 是磁场为 0 T 时的临界温度, $b=0.59$. 由超导导线与氦之间的热平衡方程

$$\frac{\rho_{Cu} I_{op}^2}{A_{Cu}} \leq P_w \cdot h(T_c - T_{op}), \quad (4)$$

其中湿润周长可以表示为

$$P_w = K_p \pi d N = 4K_p \pi (A_{Cu} + A_{sc})/d, \quad (5)$$

可得上极限电流

$$I_{up,lim} = \sqrt{\frac{P_w h A_{Cu} (T_c - T_{op})}{\rho_{Cu}}}. \quad (6)$$

还可求得下极限电流

$$I_{low,lim(I_c)} = \frac{A_{Cu} P_w h (T_c - T_{op})}{\rho_{Cu} I_c}. \quad (7)$$

最后是稳定裕度: 即单位体积的超导体在不失超时所能承受的最大输入(干扰)能量. $I_{op} < I_{up,lim}$, 也即冷却好区 (well-cooled regime)^[1,2]

$$\Delta E_{wc} = \int_{T_{op}}^{T_{cs}} \frac{A_{He}}{A_{sc}} C_{He} dt + \int_{T_{op}}^{T_{cs}} C_{sc} dt \approx \int_{T_{op}}^{T_{cs}} \frac{A_{He}}{A_{st}} C_{He} dt = C_{He} \frac{A_{He}}{A_{st}} (T_{cs} - T_{op}). \quad (8)$$

$I_{low,lim} < I_{op} < I_{up,lim}$, 在过渡区 (transition-regime)

$$\Delta E_{tr} = \int_{T_{op}}^{T_{rec}} \frac{A_{He}}{A_{st}} C_{He} dt + \int_{T_{op}}^{T_{rec}} C_{sc} dt = \dots = C_{He} \frac{A_{He}}{A_{st}} (T_{cs} - T_{rec}). \quad (9)$$

结合组分系数并考虑到 Stekly 参数 α 来表示导体的稳定性为

冷却好区 (well-cooled regime)

$$E = (1 - f_{cu} - f_{nc}) \rho C_p (T_{cs} - T_{op}) / (f_{cu} + f_{nc}). \quad (10)$$

过渡区 (transition-regime)

$$E = (1 - f_{cu} - f_{nc}) \rho C_p (1 - \alpha) (T_{cs} - T_{op}) / (f_{cu} + f_{nc}). \quad (11)$$

2 CICC 稳定性仿真程序

2.1 CICC 参数输入

CICC 参数的输入主要包括几何结构参数、电磁参数以及其它程序中计算所需要的特定属性和性能参数. 为了后面的计算提供数据, 即初始化的需要, 把输入参数传输给的变量都设定为全局变量. 而且在选定超导材料 NbSn(铌三锡)或 NbTi(铌钛)时, 超导的临界温度 T_c 、临界磁场强度 $B_{c(0)}$ 和临界电流密度 $J_{c(B,T)}$ 随之给定, 对 Nb₃Sn 而言, 临界电流密度为 $J_{c(B,T,e)}$.

在输入参数时, 程序会根据 NbTi 和 NbSn 的不同采用相应的公式计算临界电流密度, 比如 NbTi 为

$$J_{(B,T)} = C_0 \frac{b^n (1-b)^\beta (1-t^n)^\gamma}{\beta}. \quad (12)$$

2.2 CICC 稳定性计算

获得参数值后, 首先进行几何结构和电磁计算, 几何结构计算主要包括各级绞缆直径、CICC 中超导、铜和氦的面积 A_{sc} , A_{cu} 和 A_{He} 各自的组分系数. 电磁计算包括临界电流、临界温度、湿边周长、恢复温度、分流温度、极限电流等. 这些变量也是全局变量, 为后面温度裕度和能量裕度(稳定性裕度)的计算提供了数据.

同时程序在计算时会自动判断给定的最小或最大运行电流是否小于下临界电流或大于上临界电流; 如果小于下临界电程序会有提示, 但程序仍能继续向下运行, 如果大于上临界电流, CICC 的实际稳定性就会出现意想不到的结果, 所以程序会首先有提示, 接着停止运行.

程序利用几何结构计算和电磁计算得到的结果, 根据 CICC 运行电流的区间 I_{min} 和 I_{max} 来循环计算温度裕度和能量裕度, 同时把相应温度裕度和能量裕度值以曲线画出来。

在计算温度裕度和能量裕度(稳定性裕度)的同时, 利用 TADOQuery 组件程序会提示是否要把计算的结果保存到数据库中. 如果保存, 以便以后查询这些数据以及为 CICC 的设计提供参考; 若不保存, 程序的计算速度会快些。

图 3 为 CICC 温度裕度、稳定裕度的运行结果, 界面数据查询以及优化等情况没有在此详述。

为了比较工程设计值和仿真分析及计算结果, 从数据库中调出相同运行条件下的数据作分析比较, 如表 2 所示。

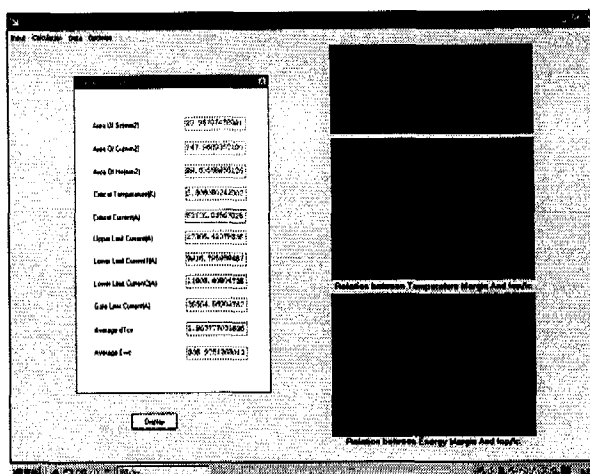


图 3 仿真计算结果

Fig. 3 Result of simulative calculation

表 2 设计值与仿真计算结果比较

Tab. 2 Compare the designed value with result of simulation

参数	设计计算结果	仿真计算结果
A_{sc}/mm^2	31.239 6	29.958 0
A_{cu}/mm	153.370 1	147.967 0
T_c/K	6.81	6.806 1
T_{cs}/K	6.14	6.142 7
T_{cs}/K	1.94	1.942 7
I_c/A	56252	56 173.507 2
$I_{lim\ low}/A$	9 800	9 308.184 0
$I_{lim\ upp}/A$	19 420	22 866.423 8
$\Delta E/(mJ \cdot mm^{-1})$	216	276.097 5
运行条件 $B=5.8\ T, T=4.2\ K, I_{op}=14\ 300\ A$, 入口压力 $0.4\ MPa$		

由表 2 可知, 仿真分析及计算结果与工程设计值基本吻合; 上极限电流和能量裕度有一定误差, 经分析, 这与工程设计中空隙率、铜的截面积、非铜截面积有关, 以及由计算湿润周长时所取系数、计算能量裕度的传热系数、氦的热容不同所致。

3 结 论

CICC 设计中稳定性的仿真分析和计算是热核聚变装置上磁体系统在励磁条件下正常稳定运行的先决条件, 同时也是实现聚变装置中大截面圆形或大拉长比 D 形等离子体长时间稳态运行的前提. 经仿真计算的稳定值与经验设计值相吻合, 这为 EAST, KSTAR, ITER 等实验装置中磁体系统 CICC 设计提供简洁快速和方便。

参考文献:

[1] Lue J W. Review of stability experiments on cable-in-conduit conductors[J]. Cryogenics, 1994, 34(10): 779-786.
 [2] Bottura L. Limiting current and stability of cable-in-conduit conductors[J]. Cryogenics, 1994, 34(10): 787-794.
 [3] 只飞等. 最新 Delphi7 数据库开发指南[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2003: 110-128.