

CICC 超导体数字模拟设计

蒋华伟, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: CICC 超导体是大型低温超导磁体的首选导体, 在大电流和快速变化磁场环境以及给定稳定性裕度等条件下, 开展 CICC 超导体结构的优化设计及稳定性分析的研究就显得非常重要。因此文中针对 CICC 导体设计, 提出数字模拟设计的想法, 并将数字模拟设计结果与工程设计值进行了比较和分析, 二者基本吻合。

关键词: CICC; 数字模拟设计; 稳定性裕度

1 前言

CICC(Cable-in-Conduit Conductor), 简称管内电缆导体或铠装电缆导体。作为内冷超导家族的一员, 早在 1975 年前已经引起人们的关注^[1]。起初这些导体是由充满液氮的导管及缠绕在该导管表面的超导/铜缆所构成。由于管内高速湍流的液氮导致很大的压降以及在低温下巨大的功率损耗, 这样, 经 Hoenig、Iwasa 和 Montgomery 等人建议, 将导体细分为许多很细小的股, 再由股构成电缆。后来又由 Lue 等人提出在导管上打孔的方法以解决大截面导体失超压力过大的问题, 为了限制通过孔渗透外泄的氦及其流动方向又把导体设计成双层导管, 在双层导管之间形成氦的回路, 从而演变成现在的 CICC 导体。

目前在中国建设的国家重大科学工程项目 EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)、印度的 SST-1(Steady State Tokamak-1)、韩国的 KSTAR(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) 以及 ITER(International Thermal-nuclear Experimental Reactor) 等超导核聚变实验装置或实验堆上都无一例外地采用了 CICC 导体。

图 1 为 EAST 装置上的超导纵场(Toroidal Field, TF)磁体的 CICC 结构。它是由四级绞缆构成, 第一级子缆由 2 根 NbTi/Cu 股线和 1 根纯铜股线组成。随后二、三级的子缆分别由 3 根一级子缆、4 根二子级缆分别构成, 最后一级即第四级是由 5 根三级子缆围绕一个 CCC(Center Copper Cable)形成, 然后用 0.1 mm 的不锈钢薄带进行叠包, 接着穿管再加工成方形截面。

工程上 CICC 导体的设计工作是各种参数的优化过程, 工作量较大。如果有数字模拟设计辅助, 则工程量会相应的减轻。至今 CICC 导体数字模拟设计的报导较少, 鉴于此, 本文进行了 CICC 导体数字模拟设计的尝试。

2 CICC 导体数字模拟设计

2.1 CICC 导体设计的基本思路

CICC 工程设计通常的方法是, 根据预先设定的第一级子缆结构及导体的运行条件, 例如运行电流、温度、背景场及预定的稳定性裕度及导体的空隙率参数等, 计算出临界电流密度、临界温度、分流温度、温度裕度, 初定第一级绞缆中超导及铜的股线数, 依此逐步粗略的定出二级子缆、三级子缆、四级子缆的股数,

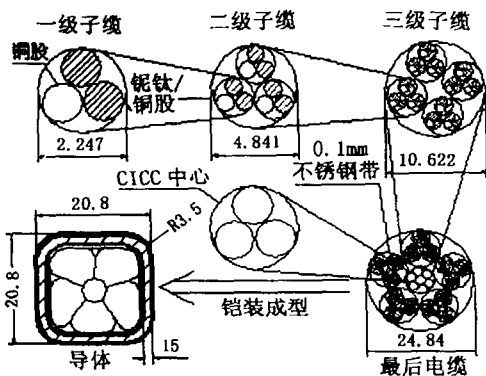


图 1 CICC 结构

获得导体的基本结构。根据导体的基本结构,可以得到各级子缆中超导面积和铜的面积,其中铜的面积指的是超导体股线中铜的面积。接下来应对导体的各种参数重新进行校核计算,其中最重要的是对导体稳定性裕度的计算。如果稳定性裕度的计算值与预定稳定性裕度相符,则导体的设计基本符合要求,否则需要重新进行导体的优化和计算,直到最终符合设计要求为止。

数字模拟设计程序的思路和工程设计思路基本相同,即根据给定的初始稳定性裕度,来确定 CICC 导体结构。但在模拟计算中采用了以下假定条件:

①参与绞缆的纯铜股线是可以起到分流作用的稳定体(Stablizer)。因此在程序的计算中,铜的面积包括了起到分流作用的纯铜股线的面积,简称为分流铜的面积。

②获得合理的导体电流密度,设定导体运行在过渡区间,即运行电流大于下极限电流,小于上极限电流。并限定 Stekly 参数小于 1,即导体运行时产生的焦耳热小于冷却氦带走的能量。

③一级子缆采用 3 根股线绞缆(包括超导体股线和铜股线),这种结构相对比较稳定,在各级绞缆和最后压缩中不易发生位置变化,这种结构对导体的稳定性有利。

同时,在各级绞缆中,程序对导体进行了如下处理:若子缆间内切圆的直径大于 1mm,则用相应的铜线填充,以此增强导体结构的稳定性。

有了上述假设条件和给定的基本数值,就可以由程序开始优化计算。程序首先给出的是几种基本符合条件的导体结构,然后再由程序根据空隙率、铜超比进行优化设计,并校核稳定性裕度,最后给出所设计的导体结构示意图,同时打印出导体设计报告。

2.2 CICC 导体数字模拟设计

考虑电缆中氦与股线之间的热功率平衡,以及根据假定导体运行在过渡区(即 $I_{\text{low,lim}} < I_{\text{op}} < I_{\text{upp,lim}}$),从此区间的稳定性裕度可获得 Stekly 参数 α 的表达式如下:

$$\alpha = 1 - \frac{(1 - f_{\text{He}})E_{\text{wr}}}{f_{\text{He}} \rho C_p (T_c - T_b)} \quad (1)$$

公式中 f_{He} 为 CICC 导体的空隙率, E_{wr} 代表过渡区的稳定性裕度, ρ 和 C_p 分别是氦的密度和定压比热, T_c 和 T_b 分别是超导体的临界温度和运行温度。

由于 Stekly 是一个表示导体焦耳热产生及其与氦之间热量转移的比率参数,很显然,如果导体能稳定运行,则该参数一定不大于 1。这时又可得:

$$\alpha = \frac{\rho_{\text{cu}} I_{\text{op}}^2}{P_w h A_{\text{cu}} (T_c - T_b)} \quad (2a)$$

式中 ρ_{cu} 为铜的电阻率, P_w 为导体的湿润周长, A_{cu} 为 CICC 导体中铜的面积, h 为氦的热传递系数,它是一个变化量,在早期低于 1ms 时有一个初始峰值;在随后几 ms 到大约 100 ms 的范围内,初始峰值的下降近似于时间平方根的倒数;随后出现比较稳定的值。由于数字模拟的前提是导体处于稳定运行状态,故取稳定值。

因为在数字模拟计算时需要获得 CICC 超导缆的湿润周长、超导组分和铜组分的面积等,所以需要由 (2a) 进行变换,得到铜的面积和湿润周长乘积的表达式:

$$\beta = P_w A_{\text{cu}} = \frac{\rho_{\text{cu}} I_{\text{op}}^2}{\alpha h (T_c - T_b)} \quad (2b)$$

根据上述“第一级子缆采用 3 根股线绞缆”的假设条件,又可以分为以下三种情况:

- (1)第一级子缆完全由 3 根超导体股线构成;
- (2)第一级子缆由 2 根超导体股线和 1 根纯铜股线构成;
- (3)第一级子缆由 1 根超导体股线和 2 根纯铜股线构成。

由于设计的是超导体,排除完全由 3 根纯铜股线构成的情况。这里以情况一为例,即以第一级子缆完全由 3 根超导体股线构成来讨论。首先得到下面的表达式:

$$P_w = N_x \pi d_x K_p \tag{3}$$

$$A_{\alpha} = \frac{R_x \pi d_x^2 N_x}{4(R_x + 1)} \tag{4}$$

式中 R_x 表示铜超比, d_x 、 N_x 分别代表 CICC 导体中超导体线的直径和根数, K_p 是计算湿润周长因子。考虑到 CICC 导体的股线在绞缆时被挤压在一起,湿润周长减小,对三角股一般取为 5/6。

让式(3)和式(4)左右相乘得:

$$P_w A_{\alpha} = \frac{K_p \pi^2 d_x^3}{4(R_x + 1)} N_x^2 = \gamma N_x^2 \tag{5}$$

为了数字模拟计算方便,用 γ 表示 $\frac{K_p \pi^2 d_x^3}{4(R_x + 1)}$ 。

由(2b)和(5)式可得 CICC 导体中超导体线的根数。

$$N_x = \sqrt{\beta/\gamma} \tag{6}$$

同理可以获得其它情况下 CICC 导体中超导体线的根数 N_x 和纯铜股线的根数 N_{cu} 。

这样模拟程序就会根据预先给定出的稳定性裕度,首先调用子程序计算 $P_w A_{\alpha}$ 乘积,然后调用计算超导体线根数的子程序,在对计算进行比较后,获得 CICC 导体中相对合理的超导体线的根数和分流铜股线的根数,为保证导体的稳定性裕度,一般程序最后给出的超导体线的根数和分流铜股线的根数偏大 5% 左右。

根据计算得到的 CICC 中超导体线的根数和分流铜股线的根数,程序将根据第一级子缆的结构,通过优化计算,初步确定 CICC 导体的结构。

上面的计算仅仅是根据给定的运行条件和稳定性裕度,以及假设的前提条件下计算得出 CICC 导体的基本结构。

接着还要对设计出来的 CICC 导体结构进行稳定性校核,也即对所设计的 CICC 导体的分流温度、温度裕度、稳定性裕度、空隙率和铜超比等参数进行校核。

首先按给定的运行条件来确定临界电流密度。以 NbTi 为例,其临界电流密度为:

$$J_{(B,T)} = \frac{C_0 b^{\alpha} (1-b)^{\beta} (1-t^{\alpha})^{\gamma}}{B} \tag{7}$$

公式中, $J_{(B,T)}$ 是给定运行条件下的临界电流密度, b 是背景场和该温度下临界场之比, t 是运行温度与临界温度之比, B 是运行时的背景场强。在 5T 和 4.2 K 以及 2900 A/mm² 条件下,常数 $C_0 = 8.03 \times 10^{10}$ AT/mm², $\alpha = 0.57$, $\beta = 0.9$, $\gamma = 2.32$ 和 $n_i = 1.7$ 。

然后根据下面的式子获得临界电流、分流温度、温度裕度、稳定性裕度等^[2-5]。

$$I_c = J_{(B,T)} \cdot A_x \tag{8}$$

$$T_x = (T_c - T_b) \left(1 - \frac{I_{op}}{I_c}\right) + T_b \tag{9}$$

$$\Delta T_s = T_{\alpha} - T_b \tag{10}$$

$$E_w = \frac{\rho_c (1 - f_{\alpha} - f_{\pi}) (1 - \alpha) (T_{\alpha} - T_{op})}{f_{\alpha} + f_{\pi}} \tag{11}$$

根据上面的表达式最终确定温度裕度和稳定性裕度是否符合预定的设计要求,当然这个过程是伴随着调整铜超比来

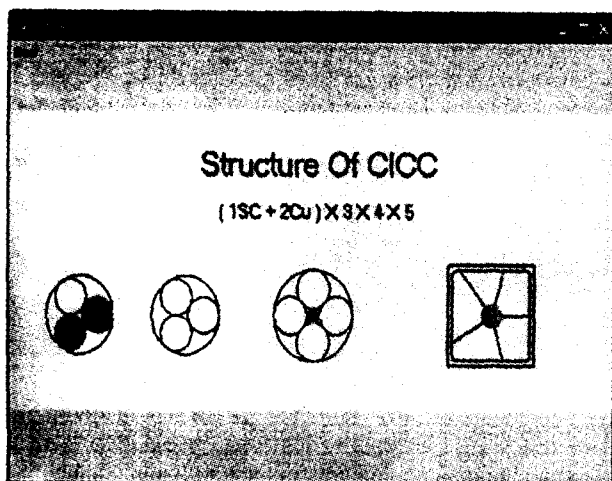


图 2 是程序给出的 CICC 导体结构。

3 结果比较与分析

我们从程序数据库中调出相应运行条件下的数据,并将其与工程设计值列表比较如下。

由表 1 可知,数字模拟程序给出的 CICC 结构与工程设计结果基本吻合。不同的是:数字模拟结果在三级子缆和最后绞缆中分别出现了一个直径为 1.13mm 和 1.97mm 的铜股线,而工程设计结果是在最后一级采用了一个 CCC(Central Copper Cable)。 A_{cu} 与 A_x 也有所不同(由于每级绞缆系数不同导致 A_x 差异)。 I_c 不同,主要是因为 I_c 计算方法不同所致(数字模拟采用 $I_c = A_x \times J_c$;工程是由经验给定某一运行条件下单股超导线的临界电流计算而来)。 ΔE 不同主要是因为 A_{cu} 与 A_x 不同,以及由临界温度、临界电流的差异所造成的分流温度不同等所致。针对这种问题,在程序的进一步开发中拟采用优化铜超比,及选取合适的湿润周长系数来弥补计算误差。

表 1 工程设计值与数字模拟计算结果比较

基本条件 结构	$B_{max}=2.5T, T=4.2K, I_{op}=14500A$	
	工程设计值	数字模拟结果
一级子缆	(1SC+2Cu)	(1SC+2Cu)
二级子缆	(1SC+2Cu)×3	(1SC+2Cu)×3
三级子缆	(1SC+2Cu)×3×4	(1SC+2Cu)×3×4+φ1.13Cu
CICC 导体	(1SC+2Cu)×3×4×5+1CCC	((1SC+2Cu)×3×4+φ1.13Cu)×5+φ1.97Cu
铜超比	1.38	1.38
A_{cu} (mm ²)	127.38	119.27
A_x (mm ²)	15.478	14.987
T_c (K)	8.228	8.24
T_a (K)	7.23	7.026
I_c (A)	54000	48187
I_{low} (A)	9205	9971
I_{up} (A)	22420	21920
ΔE (mJ/cm ³)	614	581.9

4 结束语

CICC 导体的设计关系着聚变装置中磁体系统的稳定运行。经数字模拟设计的 CICC 导体结构与工程设计的情况基本吻合,这为磁体系统 CICC 导体的设计提供了参考。

(下转 42 页后)

- (1. Department of Physics and Material Physics Laboratory, Zhengzhou University;
2. Department of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The microstructure and properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_{7-d}$ ($x=0\sim 0.5$) samples have been studied by means of XRD, TG, standard DC four-probe method. The doping effect of Co on the oxygen permeation properties of the mixed conductors $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Co}_x\text{O}_{7-d}$ was investigated. It was found that when $x < 0.05$ Co doping can improve the oxygen permeation properties. The highest oxygen permeation rate $0.53 \text{ ml/min} \cdot \text{cm}^2$ is obtained when $x = 0.05$ for a 1.4 mm thickness $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$ membrane at 940°C . When $x > 0.05$ the oxygen permeation rate decreases and it is even smaller than YBCO when $x > 0.1$. The influence of Co content on the phase structure and the bonding energy difference between Co—O and Cu—O were used to explain the oxygen permeation properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$.

Keywords: $\text{YBa}_2\text{Cu}_{2.95}\text{Co}_{0.05}\text{O}_{7-\delta}$; Co doping; Oxygen permeable membrane

作者简介:胡捷,女,1957年出生,副教授,从事功能材料应用研究。

(上接 第 37 页后)

参考文献

- 1 Lawrence Dresner, Twenty Years of Cable-in-Conduit Conductors, 1975—1995 Journal of Fusion Energy, 1995, 14(1)
- 2 Bottura L, Mitchell N, Minervin J V, Design criteria for stability of cable-in-conduit conductors. Cryogenics, 1991, 31(7): 510—515
- 3 Lue J W, Review of stability experiments on cable-in-conduit conductors. Cryogenics, 1994, 34(10): 779—786
- 4 Bottura L, Limiting current and stability of cable-in-conduit conductors. Cryogenics, 1994, 34(10): 787—794
- 5 Li Baozeng, Bi Yanfang, Wu Di, et al, Design and Stability Analysis of HT-7U PF Conductor Cryogenics and Superconductivity, 2000, 28(2): 8—14

Numeric Simulation Design of CICC

Jiang Huawei, Wu Songtao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

Abstract: CICC has been the first selected conductor for large cryogenic superconducting magnets. It is very vital to optimize the CICC configuration and analyse its stability with high current, rapid changing magnetic field, and fixed energy margin. So, in this paper a try for the numeric simulation design is put forward aiming the conductor configuration design. The simulation outcome was compared with engineering design one. The comparing results are encouraged.

Keywords: Cable-in-conduit conductor; Numeric simulation design; Energy margin

作者简介:蒋华伟,男,1970年出生,博士研究生,主要从事 CICC 导体分析及数字模拟。