

# 基于应变 CICC 导体模拟设计模型研究

蒋华伟<sup>1</sup>, 武松涛<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学, 河南郑州 450001; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要:** 根据工程设计经验,为减轻 CICC 导体设计工作量和缩短设计周期,提出了基于稳定性和应变的导体模拟设计理念,研究了应变对临界电流密度影响的量化效果,建立了导体数值仿真设计模型,进行了导体结构的模拟设计,并将数值仿真设计与工程设计进行了比较和分析,结果显示二者吻合良好。

**关键词:** 应变; CICC; 数值模拟; 稳定性; 导体设计

**中图分类号:** TM249.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1334-05

## Research of Simulation Design Model for CICC Based on Strain

JIANG Hua-wei<sup>1</sup>, WU Song-tao<sup>2</sup>

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract:** According to the engineering design experience, to reduce the design task and time of CICC (cable-in-conduit conductor) in the superconducting magnet, a simulation design idea based on stability and strain is presented. The effect of strain on critical current density is investigated, and a corresponding quantification method is given. A model of numerical simulation design of CICC is built, and the structure of CICC is designed by the model. The numerical simulation design coincides well with the engineering design.

**Key words:** strain; cable-in-conduit conductor; numeric simulation; stability; design for CICC

### 1 引言

作为 ICS (Internally Cooled Superconductor) 家族一员的 CICC (Cable-in-Conduit Conductor) 导体在 30 多年前就引起了人们的关注<sup>[1]</sup>. 起先由 Hoenig 和 Iwasa 等人对 ICS 提出了变革设计思想, 在 Miller 和 Lue 的实验基础上, 又由 Chester 给出了改善导体内部液氦流动状态的建议<sup>[1,2]</sup>. 由此从 20 世纪 60 年代后期开始出现了几种导体设计结构, Keilin 和 Klimenko 等提出了一种小型实验线圈的结构, 该线圈所用的导体是由焊接于充满液氦的铜管外围的 23 根超导线构成<sup>[1]</sup>; 1970 年, Morpurgo 设计了 Omega 磁体的内冷导体, 该导体由焊接于方形铜管外围的 NbTi (铌钛)/Cu 和铜丝共同构成的, 液氦在铜管内流动<sup>[1,2]</sup>. 所有这些导体是由铜/超导体围绕着充满液氦的内导管构成, 这造成了导体自身的稳定性缺陷. 这样, Hoenig 等人年提出了 CIC (Cable in Conduit) 概念, 即导体好冷却状态的获得不再是靠大量稳定体来实现, 而是通过细分导体成许多互换位置的股线, 再由液氦浸湿来获得.

基于此, Hoening 等提出了 CICC 模型概念<sup>[1,2]</sup>, 第一

个 Demo 磁体是 Westinghouse 的 LCT (Large Coil Task) 线圈<sup>[3]</sup>, 它是在 CIC 概念上采用 Nb<sub>3</sub>Sn (铌三锡) 绕制而成的, 当时认为这种磁体的性能要好于其它传统磁体. 因此, LCT 作为原创磁体获得的成功, 是 ICS 和 CIC 概念相结合所取得的一种进步.

但 Nb<sub>3</sub>Sn 绕制线圈所产生的应变缺陷使其难以适用实际工程的需求. 这些大型磁体不仅使用绕制和热处理等的工艺, 而且在复杂的环境下还受低温及洛伦兹力 (Lorentz Forces) 的作用, 所产生的应变对 CICC 导体的稳定运行有很大影响, 给 Nb<sub>3</sub>Sn 导体由理论探讨到工程设计应用带来了很大困难. 针对这些问题, 本文进行了相关的理论研究.

### 2 相关工作

已有的研究证明, Nb<sub>3</sub>Sn 导体的关键参数对应变是比较敏感的, 如在 CSI (Central Solenoid Insert) 模型股线上就发现临界电流对应变的依赖关系, 即在应变小于 0.5% 情况下, 测量的临界电流与经验公式计算非常吻合; 当应变大于 0.5% 时, 出现了类似于 LTRM (Low Transverse Resistance Model) 临界电流下降的情况, 且其应变为

不可逆的。

另外的一些实验研究工作也证实了该种现象。在文献[4]中给出磁场对弯绕线圈产生洛伦兹力的阐述,即弯绕线圈受到巨大的环向张应力和横向压应力,在设计磁体时,应对环向张应力和横向压应力加以考虑;文中在研究应变对铜基 NbTi 强化的 Nb<sub>3</sub>Sn 线圈临界电流密度影响的基础上得出:铜基 NbTi 的强化作用分布在线圈中间时,它的稳定性比分布在线圈周围的情况好。与文献[4]相比,在文献[5]中不仅认为 Nb<sub>3</sub>Sn 股线的性能受应变的影响,还强调应更多关注轴向应变的作用,以及 Nb<sub>3</sub>Sn 股线和电缆的弯曲影响。并在轴向应变为 -0.8% (压) 和 0.7% (拉) 之间,4.2K、12T 条件下,对 ITER 用 Nb<sub>3</sub>Sn 股线的临界电流密度进行了测量,由此,精确描述了临界电流密度对不同应变的敏感性,并分析临界电流密度的恶化情况和  $n$  值对应变的作用。

还有在文献[6]中给出了 Nb<sub>3</sub>Sn 超导体的另一个参数临界温度  $T_c$  在应变作用下的计算模型,阐述了应变的方向由波矢量空间内的强耦合来表达的概念。文献[7]研究了约瑟夫森结模型的参数(临界电流  $I_c$  和正常态电阻  $R_n$ ) 对 Shapiro 台阶高度的影响。文献[8]认为 Nb<sub>3</sub>Sn 等 A15 材料的脆性是由绕制和热处理形成的,导体的临界电流密度、上临界磁场、临界温度、以及  $n$  值等参数受应变的影响;同时 Nb<sub>3</sub>Sn 的几何分布以及丝股尺寸的精确度对热处理也有一定反作用。

目前所开展的工作多侧重于采用 CICC 技术由 Nb<sub>3</sub>Sn 股线构成的导体,其关键参数对应变的敏感性,在概念上给出了当 CICC 导体设计和绞缆时,应充分考虑 Nb<sub>3</sub>Sn 等 A15 材料股线产生应变的作用;对导体具体设计时,缺乏临界电流密度等参数受应变影响的量化模型,以及基于此对 CICC 结构进行数值模拟设计的尝试研究。为此,本文探索了应变对临界电流密度的作用,建立了 CICC 导体仿真设计模型,并进行了导体结构的模拟设计。

### 3 CICC 导体的稳定性

#### 3.1 导体稳定性

稳定性是 CICC 导体设计的关键。CICC 是由股线、子缆以及在它们的空隙中流动的迫流氦组成,其间的热交换是一个复杂的过程;当导体受到扰动时,如果液氦及导体的焓差小于扰动能量,就会有正常区的产生、甚至可能发生失超传播。若干扰能量足够大时,就可能使导体受到的扰动高于其可承受的能量(能量裕度)从而产生失超现象。因此,CICC 导体的稳定性就是当导体受到外界干扰时仍能保持其超导特性而不失超的能力,导体的稳定裕度是指单位体积不失超时所能承受

的最大干扰能量。

CICC 导体的稳定性受某一温度范围内液氦焓差的限制,可以对一定温度区间内的热容进行积分得到焓差的值。

$$\Delta H = \frac{A_{hc}}{A_{cs}} \int_{T_{op}}^{T_{sc}} C_{hc} dT \quad (1)$$

公式中的  $A_{hc}$  和  $A_{cs}$  是液氦和超导体的面积,  $C_{hc}$  是液氦的热容,  $T_{cs}$  和  $T_{op}$  是分流温度和运行温度(或液氦的温度)。这样根据能量平衡并结合在整个干扰区间内液氦和股线的情况,可以粗略地估计出在好冷却区间、过度区间和差冷却区间的稳定性裕度<sup>[9]</sup>。

#### 3.2 稳定性与质量流

另外 CICC 导体的稳定性还与液氦的质量流有一定关系,在对 ITER 的导体进行实验分析时就发现液氦的有用焓值(稳定性)与质量流的关系如图 1 所示。

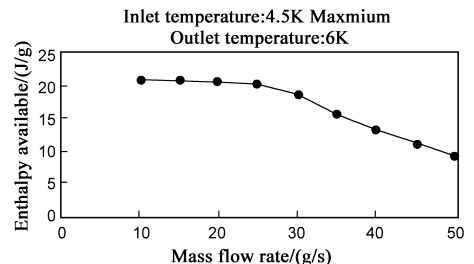


图1 焓值与质量流的关系图

实际研究工作中,稳定性与质量流关系的资料都是如图 1 所示的曲线图,而由这些图不仅得不出 CICC 稳定性与液氦质量流之间的真正关系,甚至也难以获得曲线上每一点的准确数据,在用程序进行导体稳定性研究及模拟设计时,由于不知道稳定性和质量流之间的确定关系,就无法进行精确的计算,因此需要对它们进行量化,用数学方法来表达它们间的定量关系。为此采用图像处理 and 最小二乘法相结合的方法来量化它们间的关系<sup>[10]</sup>。对图像进行处理后,利用最小二乘法对二值化的图像曲线进行拟合,就可以获得量化的函数表达式,这样就能够为后面的 CICC 导体模拟设计提供经验计算模型。

### 4 CICC 导体设计模型

#### 4.1 CICC 导体设计的基本思路

针对一级子缆由包含铜股线在内的 3 根股线构成的情况,已经进行过数值模拟<sup>[9]</sup>。本次的情况是给定运行电流、温度、背景场,及预定的稳定性裕度、温度裕度、导体的空隙率等参数,没有给出一级子缆中超导股线的直径和铜超比。其设计的基本思路是:在给定运行条件下,根据空隙率,由稳定性裕度、温度裕度等参数,结合 Stekly 小于 1 的情况,利用导体中铜的面积和湿边周长(稳定性裕度)、电缆空间电流密度(优化铜组分)

以及超导材料的临界电流密度,推导出关于超导线线的根数、超导线线的直径和铜超比的矩阵方程,以此获得 CICC 导体的基本结构.结合应变对临界电流密度作用的数学模型开展导体稳定性研究,并进行优化设计,以获得合理的导体结构.

在仿真计算中采用了以下假定条件:

(1)一级子缆采用 3 根超导线线.

(2)为获得合理的电流密度,设定导体运行在过度区间,并取 Stekly 参数小于 1.

(3)若有纯铜股线则可以处理成三种情况:在计算起稳定作用的铜面积和湿边周长时都包括纯铜股线的作用;仅在计算起稳定作用的铜面积时考虑铜股线的作用;仅在计算湿边周长时考虑铜股线的作用.

## 4.2 稳定性裕度公式推导

根据导体运行在过度区<sup>[9]</sup>( $I_{\text{lim,low}} < I_{\text{op}} < I_{\text{lim,up}}$ )的假设,由稳定性裕度可获得 Stekly,用  $\alpha$  表示为:

$$\alpha = 1 - \frac{(1 - f_{\text{he}})\Delta E_{\text{tr}}}{\rho C_p(T_c - T_{\text{op}})} \quad (2)$$

式中  $f_{\text{he}}$  为 CICC 导体的空隙率,  $\Delta E_{\text{tr}}$  为过度区的稳定性裕度,  $\rho$  和  $C_p$  分别是液氦的密度和定压比热,  $T_c$  是超导体的临界温度.

Stekly 参数  $\alpha$  是表示导体产生的焦耳热与该热量和液氦之间热量传递的比率,这时可得:

$$\alpha = \frac{I_{\text{op}}^2 \rho_{\text{cu}}}{P_w A_{\text{cu}} h (T_c - T_{\text{op}})} \quad (3)$$

$\rho_{\text{cu}}$  为铜的电阻率,  $P_w$  为导体的湿边周长,  $h$  为氦的热传递系数,它是一个变化量<sup>[11]</sup>.

在数值仿真计算时,需要获得 CICC 导体的湿边周长、超导组分和铜组分的面积等,需要对式(3)进行变换,结合式(2)并利用铜的面积和湿边周长乘积的表达式可得:

$$\frac{N_{\text{sc}}^2 d_{\text{sc}}^3 R_{\text{cu}}}{R_{\text{cu}} + 1} = A, \text{ 其中 } A = \frac{4 I_{\text{op}}^2 \rho_{\text{cu}}}{\pi^2 K_p \alpha h (T_c - T_{\text{op}})} \quad (4)$$

式中  $R_{\text{cu}}$  表示铜超比,  $d_{\text{sc}}$ 、 $N_{\text{sc}}$  分别代表 CICC 导体中超导线线的直径和根数,  $K_p$  是计算湿边周长因子.考虑到 CICC 导体的股线在绞缆时被挤压在一起,湿边周长将减小,需要合理的选择计算因子  $K_p$  的值,对三角股一般取为 5/6.

## 4.3 空间电流密度及铜超比优化公式推导

根据电缆空间极限电流<sup>[2,12]</sup>可得:

$$J_{\text{low,lim}} = \cos\theta \frac{4K_p h (T_c - T_{\text{op}})}{\rho_{\text{cu}} d_{\text{sc}} J_c} \times R_{\text{sc}} (1 - f_{\text{he}}) \quad (5)$$

$$J_{\text{upp,lim}} = \cos\theta (1 - f_{\text{he}}) \times \sqrt{\frac{4K_p h (T_c - T_{\text{op}}) R_{\text{sc}}}{\rho_{\text{cu}} d_{\text{sc}} (R_{\text{sc}} + 1)}} \quad (6)$$

$$J_{\text{tr},\Delta E} = J_{\text{upp,lim}} \sqrt{1 - \frac{(1 - f_{\text{he}})\Delta E_{\text{tr}}}{f_{\text{he}} C_{\text{he}} (T_c - T_{\text{op}})}} \quad (7)$$

其中式(8)~(10)分别为冷却好区的下极限电流密度、冷却差区的上极限电流密度、过度区的极限电流密度; $\cos\theta$  为扭转角,  $J_c$  为临界电流密度(它的计算见后面,是综合考虑应变的结果,4.4 中的临界电流密度计算类同).

由上极限电流密度和过度区极限电流密度联立方程可得:

$$R_{\text{cu}}(R_{\text{cu}} + 1) = B d_{\text{sc}}, \text{ 其中 } B = \frac{\rho_{\text{cu}} \Delta E_{\text{tr}} J_c^2}{4 K_p h C_{\text{he}} (T_c - T_{\text{op}})^2} \frac{2f_{\text{he}} - 1}{f_{\text{he}}} \quad (8)$$

## 4.4 温度裕度及临界电流公式推导

根据温度裕度和临界电流表达式<sup>[2,12]</sup>可得:

$$\Delta T_{\text{cs}} = (T_c - T_{\text{op}}) \left(1 - \frac{T_{\text{op}}}{T_c}\right) \quad (9)$$

$$I_c = \frac{N_{\text{sc}} \pi d_{\text{sc}}^2}{4} \frac{1}{R_{\text{cu}} + 1} J_c \quad (10)$$

由式(9)和式(10)得到下面的方程

$$\frac{R_{\text{cu}} + 1}{N_{\text{sc}} d_{\text{sc}}^2} = C, \text{ 其中 } C = \frac{\pi J_c}{4 I_{\text{op}}} \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{sc}}}{T_c - T_{\text{op}}}\right) \quad (11)$$

## 5 应变与临界电流密度计算模型

实验研究显示,CICC 导体的性能不仅受磁场梯度、温度、电流密度的分布以及股线与磁场角度的影响,还与股线的应变变化有关.在设计导体时应充分考虑导体中股线、丝中的应变状况,在特定磁场强度和温度情况下,应变通过对股线和导体电流密度的作用,从而影响到 CICC 导体的稳定性(稳定裕度、温度裕度、分流温度、甚至对交流损耗起作用).本文在模拟 CICC 导体结构设计时,对  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  材料的临界电流密度与应变(以及  $n$  值)的关系进行了如下研究.

对均匀弯曲的股线临界电流可通过下列公式计算.

$$I_{c,l} = \frac{2A_{\text{sc}}}{\pi(\epsilon_{b0}^2 - \epsilon_{bi}^2)} \int_{-\epsilon_{i0}}^{\epsilon_{i0}} J_c(B, T, \epsilon_a + \epsilon_b) \sqrt{|\epsilon_a^2 - \epsilon_b^2|} d\epsilon_b \quad (12a)$$

$$I_{c,h} = \frac{2A_{\text{sc}}}{\pi(\epsilon_{b0}^2 - \epsilon_{bi}^2)} \int_{-\epsilon_{i0}}^{\epsilon_{i0}} J_c(B, T, \epsilon_a - \epsilon_b) \sqrt{|\epsilon_a^2 - \epsilon_b^2|} d\epsilon_b \quad (12b)$$

$I_{c,l}$ 、 $I_{c,h}$  是不同条件下临界电流的计算公式方程.  $\epsilon_{b0}$ 、 $\epsilon_{bi}$  是最大、最小弯曲应变.  $J_c$  是临界电流密度,  $B$  为磁通密度、 $T$  表示温度、 $\epsilon_a$  为轴向应变.  $I_{c,0}$  标准化为在零应变和 -0.25% 轴向应之间的临界电流.对式(12a)和式(12b)中的关键参数临界电流密度  $J_c$  和应变  $\epsilon$ ,下面分别给以阐述.

根据体积钉扎力公式  $F = |\mathbf{J} \times \mathbf{B}|$ ,结合给定条件的磁场强度  $B$  和应变势能函数(与  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  等超导材料的电子-强子耦合系数相关),以及用 CICC 导体焓值

的估计公式,可获得  $Nb_3Sn$  临界电流密度,用如下公式描述.

$$J_c(B, T, \epsilon) = C(\epsilon)(B_{c2}(T, \epsilon))^{-1/2} \cdot (1 - t^2)^2 b^{-1/2} (1 - b)^2 \quad (13)$$

$$C(\epsilon) = C_0(1 - a|\epsilon|^{1.7})^{1/2} \quad (14)$$

$$B_{c2}(T, \epsilon) = B_{c20}(\epsilon)(1 - tT)(1 - t/3) \quad (15a)$$

根据实验数据以及工程实际情况,结合 Summers 公式,  $B_{c2}(T, \epsilon)$  公式还可修改为:

$$B_{c2}(T, \epsilon) = B_{c20}(\epsilon)(1 - t^2) \times (1 - 0.31t(1 - 1.77\ln t)) \quad (15b)$$

$$b = \frac{B}{B_{c2}(T, \epsilon)} \quad (16)$$

$$t = \frac{T}{T_{c0}(\epsilon)} \quad (17)$$

$$T_{c0}(\epsilon) = T_{com}(1 - a_0|\epsilon|^{1.7})^{1/3} \quad (18)$$

$$B_{c20}(\epsilon) = B_{c20m}(1 - a_0|\epsilon|^{1.7}) \quad (19)$$

上面公式中,  $J_c(B, T, \epsilon)$  是给定运行条件下的临界电流密度,  $B$  是运行时的背景场强,  $T$  是运行温度,  $\epsilon$  是股线中  $Nb_3Sn$  超导丝在纵向上的总应变. 当  $\epsilon < 0$  时 ( $Nb_3Sn$  受压时),  $a_0 = 900$ ; 当  $\epsilon > 0$  时 ( $Nb_3Sn$  受拉时),  $a_0 = 1250$ .  $C_0$ ,  $T_{com}$  和  $B_{c20m}$  是根据不同条件由实验获得经验值.

该研究模型中主要参数是  $n$  值以及  $Nb_3Sn$  的应变  $\epsilon$ , 这些参数是对经验数据调整后, 来适应实际工程和数值模拟的需要. 数值计算模型中考虑到 CICC 中电流分配不均, 对单根测试的股线  $n$  值取 12 ~ 25 之间, 并把它看作构成导体的整体股线加以综合处理.

对于应变  $\epsilon$ , 假设作用在 CICC 的 Jacket (外壳、导管) 上的机械应变全部传给导体的丝线,  $Nb_3Sn$  的有效应变  $\epsilon$  可以写成如下三个部分之和:

$$\epsilon = \epsilon_{op} + \epsilon_{th} + \epsilon_{extra} \quad (20)$$

$\epsilon_{op}$  为导体运行时的应变,  $\epsilon_{th}$  是零电流时的热应变,  $\epsilon_{extra}$  为其它额外原因导致的应变. 严格意义上  $\epsilon_{op}$  和  $\epsilon_{extra}$  是真正意义上导体的纵向应变; 实际设计中,  $\epsilon_{extra}$  与  $n$  值是影响导体结构的重要参数, 它们的变化与导体、股线的性能有关. 热应变  $\epsilon_{th}$  是从实验数据中估算出来的.

## 6 数值仿真及分析

### 6.1 数值仿真

有了上述假设条件和给定的基本数据, 以及基于应变的临界电流密度公式, 特别是式(4)、式(8)、式(11)三个方程, 结合式(13), 模拟程序就可以由此开始导体设计和优化计算. 上述三个包含  $R_{cu}$ 、 $d_{sc}$ 、 $N_{sc}$  未知量的矩阵方程一般是不难求解的, 但当把式(11)代入到式(4)时会得到类似于式(7)的方程, 这说明在空间电流密度上对 CI-

CC 导体铜组分的优化不是孤立的问题, 它与稳定性裕度、温度裕度及临界电流密度有着必然的联系.

显然, 这三个等式中实际上就只剩下两个独立方程, 因此无法唯一确定上面三个未知量. 鉴于此, 把  $R_{cu}$ 、 $d_{sc}$  表示成  $N_{sc}$  的函数, 在数值模拟时, 可以逐步尝试用一、二、三、四等层的结构来确定超导股数  $N_{sc}$ , 再求出符合实际要求的  $d_{sc}$  以及  $R_{cu}$ .

由式(11)得出  $R_{cu}$  表达式如下:

$$R_{cu} = CN_{sc}d_{sc}^2 - 1 \quad (21)$$

把式(21)代入式(4)得到如下关于  $d_{sc}$  的方程.

$$d_{sc}^3 - \frac{1}{N_{sc}C}d_{sc} - \frac{A_{cu}}{N_{sc}} = 0 \quad (22)$$

由不同的 CICC 结构确定  $N_{sc}$  后, 来求解  $d_{sc}$  获得合理的股线直径, 再由式(22)获得  $R_{cu}$ . 模拟中还给出相应的超导材料 (如  $NbTi$ 、 $Nb_3Sn$ ) 在给定运行条件下计算其临界电流密度的子程序, 以及对 CICC 导体稳定性的校核程序等. 最后运行结果如图 2 所示.

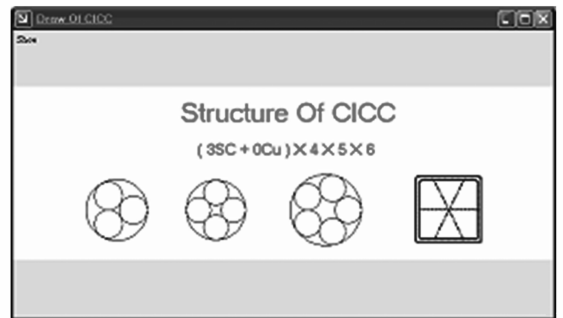


图2 数值仿真得到的CICC导体结构

### 6.2 结果比较与分析

由数据库中调出相应运行条件下的数据, 将其与 KSTAR (Korean Superconducting Tokamak Advanced Research) 的第一至第五的 PF (Poloidal Field) 的 CICC 导体设计值比较如表 1.

数值模拟中计算临界电流密度采用的数据有 7.2T 磁场强度和 4.2K 温度. 由表 1 可知, 数值仿真给出的 CICC 结构与工程设计的基本吻合. 但在参数上有不同之处: 在数值仿真中, 由于绞缆系数不同导致  $A_{cu}$  的不同;  $I_c$  的不同主要是因为  $I_c$  计算方法不同所致 (数值仿真采用  $I_c = A_{sc} \times J_c$ ; 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);  $\Delta E$  不同主要是因为  $A_{cu}$  不同. 针对这种问题, 在仿真设计程序中拟采用合适的湿边周长系数等来弥补计算误差.

通过数值仿真设计, 还可获得标准化的临界电流密度 ( $J_c/J_{c0}$ ) 作为应变函数的变化趋势 (见图 3), 弯曲应变的变化范围为 -0.00% 到 -0.70%. 弯曲应变在 -0.00% 到 -0.35% 范围内变化时, 标准化的临界电流密度首先逐渐增大, 然后随着应变的增大反而逐渐减小.

这显示实际中应变在一定范围内变化,可通过改变股线或 CICC 导体的结构,从而起到改善临界电流密度效果;但这种作用是有限的,一旦超出这一范围,临界电流密度对应变的不良敏感性就会出现。

表 1 工程设计值与数值仿真设计结果比较

运行条件	$B_{\max} = 7.2\text{T}, T = 4.2\text{K}$	$B_{\max} = 7.2\text{T}, T = 4.2\text{K}$	
	$I_{\text{op}} = 25000\text{A}, \Delta T > 1\text{K}$	$I_{\text{op}} = 25000\text{A}, \Delta T > 1\text{K}$	
	$\Delta E = 300\text{mJ}/\text{cm}^3$	$\Delta E = 300\text{mJ}/\text{cm}^3$	
	$\epsilon = -0.03\%$	$\epsilon = -0.03\%$	
比较	工程设计值	数值仿真结果	
结构	一级子缆	3SC	3SC
	二级子缆	3SC × 4	3SC × 4
	三级子缆	3SC × 4 × 5	3SC × 4 × 5
	CICC 导体	3SC × 4 × 5 × 6	3SC × 4 × 5 × 6
参数	$A_{\text{cu}}(\text{mm}^2)$	126.1	127.6
	$A_{\text{sc}}(\text{mm}^2)$	45.9	50.8
	$T_{\text{c}}(\text{K})$	12	12.57
	$T_{\text{sc}}(\text{K})$	< 10.2(9.8)	9.82
	$T_{\text{margin}}(\text{K})$	> 1(5.6)	5.62
	$I_{\text{c}}(\text{A})$	36000	37893
	$I_{\text{low}}(\text{A})$	28000	28982
	$I_{\text{up}}(\text{A})$	35000	36679
	$d_{\text{sc}}(\text{mm})$	0.78	0.779
	$R_{\text{cu}}$	1.5	1.51
	$\Delta E(\text{mJ}/\text{cm}^3)$	300	312.9

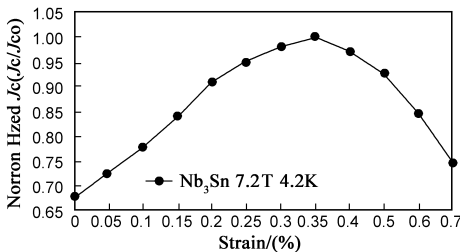


图3 标准化的临界电流密度与应变关系

## 7 结论

(1)在工程 CICC 导体设计的基础上,提出导体数值仿真设计的基本思路,给出一级子缆采用 3 根超导体股线、CICC 导体运行于过度区间以及纯铜线起不同作用的假定条件.建立了 CICC 导体中股线应变作用的量化数学模型,推导了数值模拟设计的算法,获得 CICC 导体结构,校核了关键参数。

(2)对数值仿真设计结果与工程设计值进行了比较,二者基本吻合;还对误差产生原因进行了分析,并给出了改进方法。

## 参考文献:

[1] L Dresner. Twenty years of cable-in-conduit conductors: 1975 - 1995[J]. Journal of Fusion Energy, 1995, 14(1): 3 - 11.  
 [2] B Seeber. Hand Book of Applied Superconductivity[M]. Lon-

don: Institute of physics Publication, 1998. 155 - 280.

- [3] 毕延芳. CICC 稳定性裕度设计法和 HT-7U 导体方案[J]. 核聚变与等离子体物理. 2000, 20(4): 220 - 225.  
 Bi Yanfang. CICC design with stability margin and a new version of the conductor design for the HT 7U tokamak[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2000, 20(4): 220 - 225. (in Chinese)  
 [4] Gen Nishijima, Kazuo Watanabe, Tadahiro Araya, et al. Effect of transverse compressive stress on internal reinforced Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wires and coils[J]. Cryogenics, 2005, 45(10 - 11): 653 - 658.  
 [5] Zhang Ping xiang, Liang Ming, Tang Xian de, et al. Strain influence on Jc behavior of Nb<sub>3</sub>Sn multifilamentary strands fabricated by internal tin process for ITER[J]. Physica C, 2008, 46(15 - 20): 1843 - 1846.  
 [6] W Denis Markiewicz. Elastic stiffness model for the critical temperature Tc of Nb<sub>3</sub>Sn including strain dependence [J]. Cryogenics, 2004, 44(11): 767 - 782.  
 [7] 刘飞连, 周铁戈, 王定城, 等. 约瑟夫森结参数对 Shapiro 台阶的影响研究[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 957 - 960.  
 LIU Fei-lian, ZHOU Tie-ge, WANG Ding-cheng, et al. Influence of Josephson junction parameters on Shapiro steps[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 957 - 960. (in Chinese)  
 [8] H Müller, Th Schneider. Heat treatment of Nb<sub>3</sub>Sn conductors [J]. Cryogenics, 2008, 48(7 - 8): 323 - 330.  
 [9] 蒋华伟, 武松涛. CICC 超导体数字模拟设计[J]. 低温与超导, 2005, 33(3): 34 - 37.  
 Jiang Huawei, Wu Songtao. Numeric simulation design of CICC [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2005, 33(3): 34 - 37. (in Chinese)  
 [10] 蒋华伟, 张庆州. 基于图像曲线和最小二乘法进行函数拟合的研究[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(7): 43 - 44.  
 Jiang Huawei, Zhang Qingzhou. Research on function fitting based on image curve and method of least squares[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(7): 43 - 44. (in Chinese)  
 [11] A Martinez, J L Duchateau, L Tadriss. Transverse heat transfer coefficients on a full size dual channel CICC ITER conductor [J]. Cryogenics, 2006, 46(7 - 8): 530 - 540.  
 [12] Weng Pei De, Bi Yan Fang, Chen Zhuo Min, et al. HT-7U TF and PF conductor design[J]. Cryogenics, 2000, 40(8 - 10): 531 - 538.

## 作者简介:

蒋华伟 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师. 在东北大学和中国科学院等离子体物理研究所分别获得工学学士和工学博士学位. 研究方向为超导电缆设计、CICC 数值仿真设计, 智能图像处理和识别及模式识别等. E-mail: lhwcad@sohu.com

