

管内电缆导体结构模拟设计优化模型

蒋华伟^①, 武松涛^②, 成俊生^③

① 河南工业大学信息科学与工程学院, 郑州 450001;

② 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

③ 中国科学院电工研究所, 北京 100080

E-mail: lhwcad@sohu.com

2010-08-08 收稿, 2011-01-10 接受

科技部国际科技合作计划重点项目(2004CB720704)和河南省高等学校青年骨干教师计划(2010GGJS-088)资助

摘要 针对管内电缆导体(Cable-in-Conduit Conductor, CICC)设计中的复杂性问题, 提出了基于稳定性和应变作用的导体模拟设计模型, 研究了应变对临界电流密度影响的量化效果, 建立了耦合损耗等多变量制约的超导导体结构设计数学规划方法, 获得优化后的合理导体结构. 并将数值模拟设计的 CICC 导体与 KSTAR(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research)工程设计进行了比较和分析, 结果显示二者吻合较好.

关键词

CICC

应变

数值模拟设计

稳定性

优化模型

CICC 导体即铠装电缆导体, 是由内冷超导体(internally-cooled superconductor)演变而来. 早在 1975 年前它已经引起了研究者的关注^[1], 后来 Chester 提出了改善导体性能的建议并由 Altov 等设计了几种导体结构^[1~3], 在这些研究工作基础上, Hoenig 等提出了 CIC(Cable in Conduit)和 CICC 概念模型^[1~3]. 这些大量探索实验使得 CICC 导体具有超临界氦良好冷却、高电压绝缘、低交流损耗和多级变位绞绕等优点, 而成为中国大科学工程 EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)、韩国 KSTAR(Korean Superconducting Tokamak Advanced Research)以及国际热核聚变试验堆 ITER(International Thermal-nuclear Experimental Reactor)上的 TF(Toroidal Field), PF(Poloidal Field), CS(Central Solenoid)和 CC(Correction Coils)的首选导体.

CICC 导体是由超导组分、稳定体、冷却介质和导管构成的复合体, 其间的热交换是一个复杂的过程, 加上 CICC 导体的稳定性还受到能量裕度和交流损耗等的制约, 使得 CICC 导体的设计理论非常复杂, 为了在理论研究和工程实际中快速和准确地设计 CICC

导体, 研究人员对导体开展了数值模拟设计研究.

起初进行的是导体结构数值设计和失超模拟研究. 如文献[4]中的 CID(Cable Interactive Designer)就是用于模拟绞绕的, 它能生成超导电缆的几何形状. 文献[5]中提出子缆包绕及中心冷却的 CICC 导体三维绞绕数值模拟方法, 它可以输出股线的空间结构、每级子缆的面积等. 文献[6]中用于模拟迫流冷却导体失超及稳定性分析的 Gandalf 程序, 它能根据 CICC 导体的结构、运行条件以及初始热扰动和样品长度, 来模拟导体失超情况. 另外 Bottura 还在文献[7]中对聚变实验堆超导磁体设计中稳定性裕度、交流脉冲(损耗和电流分布)与失超保护(热点温度和最大失超压力)3个限制参数进行了研究, 通过择中构建 CICC 超导电缆的稳定性和电流函数, 提出基于简化稳定性和热点的 CICC 导体有效设计规则. 这些工作中 CID 等不是根据能量裕度、温度裕度及电流等条件来计算获得导体结构, 而是通过机械式简单堆积构成导体的结构; Bottura 的 Gandalf 等主要是针对已有的 CICC 导体进行稳定性和失超模拟分析, 不涉及导体结构的模拟设计.

英文版见: Jiang H W, Wu S T, Cheng J S. Optimization model of a structural simulation design for a CICC. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4408-0

为获得大电流和快变磁场中的高磁场强度,高温超导材料被尝试运用^[8],但总体上它们还处于研究阶段,许多科学问题还有待进一步探索,目前在低温铌钛(NbTi)超导技术基础上开展了铌三锡(Nb₃Sn)导体的研制。但 Nb₃Sn 在绕制和热处理线圈时带来的应变使其难以满足工程应用的需求,即由热、机械及其他原因导致的综合应变使 CICC 导体中的丝、股性能恶化,从而导致 CICC 导体稳定性进一步降低,因此,应变成为影响着 CICC 导体稳定运行的一个关键原因。针对这些问题已进行了相关的理论探索。文献[9]精确描述了临界电流密度对不同应变的敏感性,并分析了临界电流密度的恶化情况和应变对 n 值的作用。文献[10,11]中 Zhai 针对热应变和弯绕应变使 ITER 和混合强磁场的 Nb₃Sn 型 CICC 性能恶化的问题,通过周期性载荷试验,提出高性能的 FEMCAM (Florida Electro-Mechanical Cable Model)模型,获得弯应变小于 1%区间的 n 值和临界电流等的恶化情况。文献[12]中指出 Nb₃Sn 的脆性是由弯绕和热处理形成的,其临界电流密度、上临界磁场、临界温度及 n 值受应变的影响。上述工作主要通过实验和模拟手段获得应变对 Nb₃Sn 型 CICC 导体 n 值和临界电流等的恶化影响或某种关系,却没有把这些研究结果通过反向推理用于导体结构的数值模拟设计。

尽管文献[13]根据应变对临界电流密度作用量化关系进行了导体结构模拟设计,获得多种导体结构,但由于在按层(级)数进行模拟设计时,没有对每层绞缆根数进行合理性判断,结果会出现前级根数远大于后级根数情况,在工程结构上不满足机械稳定的要求,一般不被采用,显然这些研究工作没有给出更为合理的结构方式(见 3.3 节)。因此,本文在考虑应变及交流损耗等对稳定性影响基础上,设计了股线根数、耦合损耗时间常数等多变量制约的非线性数学规划方法,对参数进行优化,构建 CICC 导体数值模拟设计模型,获得优化后更为合理的导体结构。

1 CICC 导体稳定性

1.1 CICC 导体稳定性零维和一维模型

对短样 CICC 导体精确计算稳定性裕度时,可忽略加热区的长度。在股线温度和液氮温度均匀的假设基础上,仅用时间作变量,以获得在短脉冲和长脉冲期间的稳定性裕度,由此得到零维模型平衡式^[14]。

该模型能简单地描述在恢复时间范围内的局部能量平衡。

但对长样有高横向电阻的 CICC 导体,其电流在全长范围内重新完全分配是很难实现的,CICC 截面上的液氮温度梯度使导体的稳定性裕度发生急剧变化,匀质处理已不再适用。考虑瞬变过程中导管的热扩散对稳定性的影响,由流体知识可得液氮(质量、动量和能量平衡)压缩流体方程,这样可建立一维模型系统^[14]。该模型是在综合考虑各种复杂因素后建立的,主要用于稳定性裕度的计算,它能预测多值稳定性的热感应流。但需对众多参数进行分析,因此还要解决稳定和失超计算量大、速度慢且不易控制等问题。

1.2 CICC 导体稳定性计算

CICC 的稳定性是导体设计计算的关键。在上述稳定性模型基础上,考虑导体的稳定性受一定温度范围内液氮焓差的限制,可以对该温度区间内的热容进行积分得到焓差值。数学描述如下:

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

其中 A_{he} 和 A_{sc} 是液氮和股线的面积, T_{cs} 和 T_{op} 是分流温度和设定运行温度, C_{he} 是液氮的热容。

根据能量平衡并结合在整个干扰区间内液氮和股线的情况,可以粗略地估计出在好冷却区间、过渡区间和差冷却区间的稳定性裕度(见文献[15])。这是后面稳定性裕度计算的基础。

2 应变与临界电流密度关系模型

Nb₃Sn 型 CICC 导体的稳定性不仅受磁场强度、温度、电流密度分布及股线与磁场角度的影响,还与股线的应变有关。在模拟 CICC 导体结构设计时,需要对应变与临界电流密度的关系进行量化研究。

2.1 应变计算模型

应变主要是指 Nb₃Sn 受到热、机械等作用的效应。根据材料力学知识,对于周期性均匀的三维实空间弹性体,假设它具有光滑连续的边界,给定边界受拉或受压的部分,剩余部分的位移可以给出,由此产生的应变就为形变与受拉(压)部分的百分比,它是影响临界电流密度的重要因素。

工程设计和数值模拟中的应变根据经验数据来调整。假设作用在 CICC 导管上的机械应变全部传给

导体的丝股, 则 Nb_3Sn 的有效应变 ε 可以写成如下 3 个部分之和:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{op}} + \varepsilon_{\text{th}} + \varepsilon_{\text{extra}}, \quad (2)$$

其中 ε_{op} 为导体纵向应变(也称为运行时应变), ε_{th} 是零电流时的热应变, $\varepsilon_{\text{extra}}$ 为其他原因导致的额外应变. 严格意义上 ε_{op} 和 $\varepsilon_{\text{extra}}$ 是导体真正的纵向应变, 实际设计中, $\varepsilon_{\text{extra}}$ 与 n 值是影响导体结构的重要参数, 其变化与导体及股线的性能有关; 热应变 ε_{th} 是从实验数据中估算出来的.

2.2 与临界电流密度关系模型

对于应变与临界电流密度关系的研究, 文献[16]中回顾和比较了 Ekin, Summers, University of Durham, University of Twente 等的临界电流密度 J_c 参数表达式, 希望由此获得一种通用的方法, 特别是能够完全适用于 ITER 磁体系统上的 Nb_3Sn 导体, 但目前仍在研究中. 本文利用文献[16,17]中的实验以及体积钉扎力公式, 结合给定的磁场强度和应变势能函数, 还有 CICC 导体焓值估计公式, 可获得 Nb_3Sn 临界电流密度的经验量化描述^[16,17], 它是 Summers 的研究结果, 并借鉴 ITER—2008 的描述获得 J_c 参数化形式, 该描述更适合 Nb_3Sn 复杂的化合物组分以及应变范围.

$J_c(B_0, T, \varepsilon) = C(\varepsilon)(B_{c2}(T, \varepsilon))^{-1/2}(1-t^2)^2 b^{-1/2}(1-b)^2$, (3)
其中 $J_c(B_0, T, \varepsilon)$ 是给定运行条件下的临界电流密度, B_0 是运行时的背景场强, T 是运行温度, ε 是股线中 Nb_3Sn 超导丝在纵向上的总应变.

$$C(\varepsilon) = C_0(1-a_0|\varepsilon|^{1.7})^{1/2}, \quad (4)$$

$$B_{c2}(T, \varepsilon) = B_{c20}(\varepsilon)(1-tT)(1-t/3), \quad (5)$$

$$b = B_0 / B_{c2}(T, \varepsilon), \quad (6)$$

$$t = T / T_{c0}(\varepsilon), \quad (7)$$

$$T_{c0}(\varepsilon) = T_{c0M}(1-a_0|\varepsilon|^{1.7})^{1/3}, \quad (8)$$

$$B_{c20}(\varepsilon) = B_{c20M}(1-a_0|\varepsilon|^{1.7}), \quad (9)$$

其中常数 a_0 的取值情况如下: 当 $\varepsilon < 0$ 时(Nb_3Sn 受压), $a_0=900$; 当 $\varepsilon > 0$ 时(Nb_3Sn 受拉), $a_0=1250C_0$, T_{c0M} 和 B_{c20M} 是根据不同条件由实验获得的经验值.

3 CICC 导体模拟设计模型

3.1 CICC 导体模拟设计思路和假定条件

CICC 导体设计的基本思路是: 在给定运行条件下, 根据空隙率、稳定性裕度、温度裕度等参数, 结

合 Stekly 参数^[18](Stekly 参数作为 CICC 导体全稳定性判据, 主要是指导体产生的焦耳热及其他扰动能量与液氮传递热量之间的比率, 即单位时间内导体的干扰与液氮冷却能力之比, 它通过大的铜超比或冷却周长/横截面来实现)的取值, 利用导体中铜超面积、湿(润)边周长和电缆空间电流密度及应变影响的临界电流密度等来推导包括股线根数、超导体线直径和铜超比等未知参数的矩阵方程, 由此模拟获得 CICC 导体的结构.

在仿真计算中采用了以下假定条件:

(1) 一级子缆采用 3 根股线绞缆, 且都为超导体线.

(2) 为获得合理的电流密度, 设定导体运行在过渡区间, 即运行电流大于下极限电流并小于上极限电流, Stekly 参数不大于 1, 使得导体产生的焦耳热小于液氮带走的能量.

(3) 若有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.

3.2 导体结构模拟设计算法模型

根据参考文献[13]导体运行在过渡区($I_{\text{lim,low}} < I_{\text{op}} < I_{\text{lim,up}}$)的假设, 由稳定性裕度、温度裕度和空间电流密度等可得如下数学模型:

$$\frac{N_{\text{sc}}^2 d_{\text{sc}}^3 R_{\text{cu}}}{R_{\text{cu}} + 1} = \frac{4I_{\text{op}}^2 \rho_{\text{cu}}}{\pi^2 K_p \alpha h (T_c - T_{\text{op}})} = A, \quad (10)$$

$$R_{\text{cu}}(R_{\text{cu}} + 1) = \frac{\rho_{\text{cu}} \Delta E_{\text{tr}} J_c^2}{4K_p h C_{\text{he}} (T_c - T_{\text{op}})^2} \frac{2f_v - 1}{f_v} d_{\text{sc}} = B d_{\text{sc}}, \quad (11)$$

$$\frac{R_{\text{cu}} + 1}{N_{\text{sc}} d_{\text{sc}}^2} = \frac{\pi J_c}{4I_{\text{op}}} \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{cs}}}{T_c - T_{\text{op}}} \right) = C, \quad (12)$$

其中 N_{sc} , d_{sc} 分别为导体中超导体线根数和直径, R_{cu} 是铜超比, I_{op} 是运行电流, ρ_{cu} 是铜电阻率, π 为圆周率, K_p 是计算湿边周长因子, α 是 Stekly 参数, h 为传热系数, T_c 是临界温度, ΔE_{tr} 是过渡区的稳定性裕度(见 1.2), f_v 为空隙率, ΔT_{cs} 为温度裕度, J_c 为临界电流密度(计算见前面 2.2 的公式(3), 是综合考虑应变的结果).

3.3 CICC 导体数值模拟设计

有了上述假设条件和给定的基本数据及基于应变的临界电流密度式(3), 利用(10)~(12)式, 模拟程序就可开始导体设计计算. 3 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(12)代入到(10)时会得到类似于(11)式的方程,这说明在空间电流密度上对 CICC 导体铜组分的优化不是孤立的,是与稳定性裕度、温度裕度及临界电流有着必然的联系.这样实际上就只剩下两个独立方程,因此无法唯一确定上面的 3 个未知量;鉴于此,可以把 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(绞缆级数)来确定超导体数 N_{sc} ,再求出符合实际要求的 d_{sc} 及 R_{cu} .

由(12)得出 R_{cu} 表达式如下:

$$R_{cu} = CN_{sc}d_{sc}^2 - 1. \quad (13)$$

把(13)代入(10)得出关于 d_{sc} 的三次方程.

$$d_{sc}^3 - \frac{1}{N_{sc}C}d_{sc} - \frac{A}{N_{sc}} = 0. \quad (14)$$

根据 CICC 导体结构,并结合细分超导丝和有利于分流原则获得合理的股线直径 d_{sc} ,由(13)获得 R_{cu} .

给定模拟运行条件: $B_{max}=7.2$ T, $T_{op}=4.5$ K, $I_{op}=35200$ A, $\Delta T_{cs} \geq 1$ K, $dB/dt=11$ T/s, $\Delta E_{tr}=400$ mJ/cm³. 根据运行条件和理论计算,由模拟设计获得 CICC 导体的股线总根数为 486,它包括四级绞缆和五级绞缆两种情况.具有四级绞缆的导体结构情况见表 1,有 6 种绞缆方式;具有五级绞缆的导体结构情况见表 2,有 4 种绞缆方式.

由表 1 和 2 可知,该模拟设计并不对每层绞缆根数进行相对合理性判断,将获得 3SC×3×6×9 和 3SC×6×9×3 等多种结构,使模拟设计的 CICC 结构不唯一,出现如 3SC×6×9×3 这样三层(级)根数 9 远大于四层(级)根数 3 的情况,它不满足工程结构机械稳定要求,因此需要进行优化给出更为合理的导体结构.

表 1 四级绞缆结构

二级子缆结构	三级子缆结构	四级子缆结构
3	6	9
3	9	6
6	3	9
9	3	6
6	9	3
9	6	3

表 2 五级绞缆结构

二级子缆结构	三级子缆结构	四级子缆结构	五级子缆结构
3	3	3	6
3	3	6	3
3	6	3	3
6	3	3	3

4 CICC 导体结构优化

4.1 导体结构优化设计

优化设计的思路和方法:首先是对每层绞缆根数进行合理性判断,即满足工程结构上的机械稳定要求;然后对符合该条件的导体结构进行交流损耗判断,通过计算耦合损耗时间常数,获得耦合损耗,循环计算出交流损耗(耦合和磁滞损耗)的最小值,得到优化后的导体结构.

这里主要对 CICC 导体的每层股线根数和交流损耗参数等进行优化,根据一般的优化问题,只要满足如下规划条件即可.

$$\begin{cases} \min(E_c) = \min(W + P) \\ \text{s.t.} \quad n_i \leq n_j \quad (i < j) \end{cases} \quad (15)$$

其中, n_i 表示第 i 子缆结构,即子缆(股线)数目; E_c 为交流损耗,它包括磁滞损耗 W (值较小,不是关键影响参数)和耦合损耗 P .

由每层股线根数条件可以判断表 1 和表 2 中的 3SC×3×6×9 和 3SC×3×3×3×6 结构符合条件.

下面从耦合损耗的计算方法上来探讨上述 CICC 导体结构的选优.考虑线圈励磁、等离子体放电或破灭等极端情况,CICC 股线的超导丝大都处在饱和状态.根据饱和系数的大小,耦合损耗可采用如下方法^[19].

$$P = \begin{cases} \frac{2\theta}{u_0} \dot{B}_T^2 (1 - \beta) & \beta < 0.31, \\ \frac{4}{3\pi} \frac{B_p}{u_0} \dot{B}_T & \beta > 0.31, \end{cases} \quad (16)$$

其中 B_T 为横向外场,饱和系数 β 为外部磁场变化率与穿透场强 B_p 之比, u_0 为真空磁导率.

由上可知,耦合损耗时间常数为关键计算参数,耦合损耗时间常数 θ 可用下面的公式计算:

$$\theta = \sum_{n=1}^N \theta_n, \quad (17)$$

θ_n 对应于第 n 级绞缆时耦合损耗时间的增加值,表达式如下:

$$\theta_n = \frac{\mu_0}{2\rho_n} \left(\frac{P_n^*}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{1 - f_{vn-1}}, \quad (18)$$

式中 P_n^* , ρ_n , f_{vn} 分别是 n 级电缆的有效扭距长度、有效电阻率和空隙率.

有效扭距长度和有效电阻率表达式如下:

$$P_n^* = P_n - \frac{r_{n-1}}{R_{n-1}} P_{n-1}, \tag{19}$$

$$\rho_n = \frac{\rho_b e_b}{\varepsilon_n R_{n-1}}, \tag{20}$$

其中 P_n, R_n, r_n 和 ε_n 分别是 n 级电缆似在扭距长度、外半径、扭绞半径及接触面比率, $\rho_b e_b$ 是接触电阻层的表征. 当 $n=2$ 时, r_1 是股线中超导丝的半径, R_1 是股线的半径.

通过模拟计算可获得上述两种 CICC 导体结构的耦合损耗时间常数和交流损耗(见表 3). 取交流损耗值较小者, 由此得出 3SC×3×3×3×6 的结构更为合理.

模拟优化后获得的 CICC 结构见图 1. 由图可知: 它的一级子缆是由 3 根 Nb₃Sn 超导股线构成, 二级子缆由 3 根一级子缆构成, 三级子缆由 3 根二级子缆构成, 四级子缆由 3 根三级子缆构成, 五级子缆由 6 根四级子缆构成, 最后穿管, 并挤压形成 CICC 导体结构.

4.2 结果比较分析

由于韩国 KSTAR 磁体系统的 TF 及 1-5PF 线圈的 CICC 导体采用了 Nb₃Sn 材料. 由数据库中调出相应运行条件下的数据, 将模拟优化结果与 KSTAR 的第一~五的 PF 的 CICC 导体设计值比较如表 4 和 5.

表 3 导体参数计算

参数	3SC×3×3×3×6	3SC×3×6×9
θ_0 (ms)	0.8677	0.8677
θ_1 (ms)	1.3894	1.3894
θ_2 (ms)	3.6906	3.6906
θ_3 (ms)	8.1790	13.209
θ_4 (ms)	12.389	27.735
θ_5 (ms)	18.095	/
θ (ms)	44.611	46.892
E_c (mJ/cm ³)	203.24	217.37



图 1 数值仿真得到的 CICC 导体结构

表 4 工程设计与仿真设计结构结果比较

结构	工程设计值	数值优化结果
一级子缆	3SC	3SC
二级子缆	3SC×3	3SC×3
三级子缆	3SC×3×3	3SC×3×3
四级子缆	3SC×3×3×3	3SC×3×3×3
CICC 导体	3SC×3×3×3×6	3SC×3×3×3×6

表 5 工程设计与数值仿真设计参数比较

参数	工程设计值	数值优化结果
A_{cu} (mm ²)	170.3	167.6
A_{sc} (mm ²)	61.9	60.2
T_c (K)	12	12.57
T_{cs} (K)	<10.2	6.58
I_c (A)	80000	84488
d_{sc} (mm)	0.78	0.779
R_{cu}	1.5	1.51
ΔE_{tr} (mJ/cm ³)	400	473.6
E_c (mJ/cm ³)	≤250	203.24

由表 4 可知, 数值仿真给出的 CICC 结构与工程设计结果相一致, 这是基于稳定性、应变影响以及交流损耗进行优化设计得到的结果.

由表 5 可得经优化设计获得 CICC 导体的交流损耗 E_c 小于工程设计值, 表明优化获得的扰动小于工程设计结果; 优化导体的稳定性裕度 ΔE_{tr} 大于工程设计值, 显示优化后导体相对更稳定; 同时优化设计中交流损耗小于工程设计和模拟设计的稳定性裕度值, 这说明优化后的 CICC 导体是可以在该条件下很好的稳定运行.

表 5 也显示优化设计与工程设计在参数上有不同之处. 如在数值仿真中, 由于绞缆系数不同导致 A_{cu} 的不同, I_c 的不同主要是因为计算方法不同所致(数值仿真采用 $I_c=A_{sc} \times J_c$, 工程上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得), 稳定性裕度 ΔE_{tr} 不同主要与 A_{cu} 有关. 针对这种问题, 在仿真设计中拟采用合适的湿边周长系数(综合考虑 CICC 导体结构, 特别是初级子缆、超导股线根数)等来弥补计算误差.

5 结论

给出导体稳定性理论概念, 结合 CICC 导体工程设计经验知识, 研究了 Nb₃Sn 的应变对临界电流密度影响的量化模型. 给出了 CICC 导体数值仿真设计的基本原则和思路, 并利用一级子缆采用 3 根超导股线、CICC 导体运行于过渡区间及纯铜线起不同作用假定条件, 获得多种 CICC 导体模拟设计结构.

根据交流损耗及工程上子缆(股线)根数和绞缆级数确定机理,建立了每层股线根数和耦合损耗时间常数等多变量制约的导体结构设计数学规划方法,对参数进行优化,通过仿真得出 CICC 导体绞缆情况,

在优化基础上获得合理的导体结构. 比较了数值仿真设计结果与 KSTAR 工程设计值,并对误差产生原因进行了分析,还给出了改进方法. 这为磁体系统中 CICC 导体的设计提供了有用的参考.

参考文献

- 1 Dresener L. Twenty years of cable-in-conduit conductors: 1975–1995. *J Fus Energ*, 1995, 14: 3–12
- 2 Seeber B. Hand book of applied superconductivity. London: Institute of Physics Publication, 1998: 265–280
- 3 Renard B, Martinez A, Duchateau J L, et al. Transverse heat transfer coefficients on a full size dual channel CICC ITER conductor. *Cryogenics*, 2006, 46: 530–540
- 4 Bottura L, Breschi M, Rosso C. Analysis of electrical coupling parameters in superconducting cables. *Cryogenics*, 2003, 43: 233–239
- 5 Qin J G, Wu Y. A 3D numerical model study for superconducting cable pattern. *Fus Eng Des*, 2010, 85: 109–114
- 6 Marinucci C, Bottura L, Vecsey G, et al. The quell experiment as a validation tool for the numerical code gandalf. *Cryogenics*, 1998, 38: 467–477
- 7 Bottura L. Stability, protection and ac loss of cable-in-conduit conductors—a designer's approach. *Fus Eng Des*, 1993, 20: 351–362
- 8 马廷灿, 万勇, 姜山. 铁基超导材料制备研究进展. *科学通报*, 2009, 54: 557–567
- 9 Zhang P X, Liang M, Tang X D, et al. Strain influence on J_c behavior of Nb_3Sn multifilamentary strands fabricated by internal tin process for ITER. *Physic C*, 2008, 46: 1843–1846
- 10 Zhai Y H, Mark D B. Florida electro-mechanical cable model of Nb_3Sn CICC for high-field magnet design. *Supercond Sci Technol*, 2008, 21: 1–15
- 11 Zhai Y H. Electro-mechanical modeling of Nb_3Sn CICC performance degradation due to strand bending and inter-filament current transfer. *Cryogenics*, 2010, 50: 149–157
- 12 Muller H, Schneider T h. Heat treatment of Nb_3Sn conductors. *Cryogenics*, 2008, 48: 323–330
- 13 蒋华伟, 武松涛. 基于应变 CICC 导体模拟设计模型研究. *电子学报*, 2010, 38: 1334–1388
- 14 Bottura L, Luongo C. Superconductors, stability in forced flow. In: John G W, ed. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering*. Milton: John Wiley & Sons, 1999. 126–158
- 15 Jiang H W, Wu S T. Research of simulation design for CICC based on energy margin and temperature margin. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2010, 20: 1436–1439
- 16 Bottura L, Bordini B. $J_c(B, T, \epsilon)$ parameterization for the ITER Nb_3Sn production. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 1521–1524
- 17 Summers L T, Guinan M W, Miller J R, et al. A model for the prediction of Nb_3Sn critical current as a function of field, temperature, strain and radiation damage. *IEEE Trans Magn*, 1991, 27: 2041–2044
- 18 Wilson M N. *Superconducting Magnets*. Oxford: Oxford University Press, 1983: 156–268
- 19 Fang J, Weng P D, Chen Z M, et al. The ac losses measurement and analysis of superconducting $NbTi$ CICC for HT-7U superconducting Tokamak. *Plasm Sci Technol*, 2003, 14: 76–82