

铌三锡管内电缆导体交流损耗计算分析模型

蒋华伟¹ 李国平¹ 武松涛² 赵玉娟¹ 刘继承¹

(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)

摘要 为解决快变磁场中大电流和应变作用下, 铌三锡(Nb₃Sn)导体交流(Alternating Current, AC)损耗的模拟实验分析问题, 本文进行了瞬变电磁场中宽应变区间的AC损耗计算技术探索, 构建应变作用下的临界电流数学模型, 把复杂变化场中基于应变的临界电流密度运用到磁滞损耗功率计算, 对耦合损耗功率计算中的导体特征参数考虑应变效应, 获得CICC导体AC损耗功率计算技术。在激发等离子体的快速励磁以及等离子体放电和破灭等情况下, 由模拟对比分析发现应变作用算法的AC损耗功率更接近工程实际值; 对比应变作用算法损耗功率和经典算法损耗功率的相对误差计算, 其误差的变化小于15%。

关键词: 铌三锡 管内电缆导体 应变 交流损耗

中图分类号: TM461; TP392

Calculation and Analysis Model of AC Loss for Nb₃Sn-Based CICC

Jiang Huawei¹ Li Guoping¹ Wu Songtao² Zhao Yujuan¹ Liu Jicheng¹

(1. Henan University of Technology Zhengzhou 450001 China

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

Abstract To solve the problem of alternating current (AC) loss mechanism for Nb₃Sn conductor with strain under the condition of high-current and transient magnetic field, research of AC loss calculation method is carried out in the transient electromagnetic field and wide range of strain. The mathematical model of the critical current with effect of strain is built. Moreover, the critical current density based on strain is introduced for the calculation of hysteresis loss power. Taking into account strain effects, the characteristic parameters are obtained, and the calculation technology of CICC AC loss power is obtained. By comparative analysis of simulation, it is found that the AC loss power calculation of the conductor with strain model is close to the actual project value. For rapid excitation, in particular plasma discharge and burst, strain model and the traditional algorithm is consistent. From the calculation of AC loss power, it can be seen that the relative error is less than 15%.

Keywords: Nb₃Sn, cable-in-conduit conductor(CICC), strain, AC loss

1 引言

在 Chester、Altov 实验研究和 Hoenig 等人提出的 CIC (cable in conduit) 概念基础上, CICC (cable-in-conduit conductor alternating) 由内冷超导导体 (internally cooled superconductor) 发展而成^[1-3]。

因其具有良好超临界氦冷却、高电压绝缘和多级换位绞缆等优点, 而成为中国的 EAST (experimental advanced superconducting tokamak)、韩国 KSTAR (korean superconducting tokamak advanced research) 以及国际热核聚变反应堆 (International Thermal-nuclear Experimental Reactor, ITER) 上的 CS (central solenoid)、TF (toroidal field) 和 PF (poloidal field) 等的首选导体。

目前设计和研制中 ITER 装置的导体将运行在

大电流励磁和快变磁场等环境,会受到 10T 以上磁场的冲击,使得 ITER 的 TF、CS 和部分 PF 线圈不得不采用铌三锡 (Nb_3Sn) 导体。但洛伦兹力以及由热反应温度到低温运行带来的综合应变给工程上 Nb_3Sn 导体的应用造成极其不利的影[4-6],这些应变导致 CICC 导体中的临界性能恶化,使得导体稳定性降低。另外在等离子体放电等快速励磁环境中, Nb_3Sn 导体还会受到不同于 NbTi 的 AC (alternating current) 损耗的影响。目前对 Nb_3Sn 导体的 AC 损耗问题研究,主要是在已有 NbTi 损耗计算模型[3,7-9]基础上开展的尝试性工作。如 Bottura 等提出的 CICC 导体 AC 损耗计算模型[10],通过引入空间磁化形状因子,把损耗分成三维标量来计算;但它不能解决快变磁场和高频下的损耗问题。还有 Egorov 给出了 CICC 导体多级绞缆中耦合损耗计算方法[11],它把时变磁场的感应电流放在每层子缆的股线对之间进行简化处理;可它是在忽略屏蔽电流及空间绞缆螺旋对 AC 损耗影响下的理想结果。另外 Van 等提出了用于 ITER 全尺寸 CICC 的 AC 损耗并行计算算法[12],可把互感系数的计算复杂度由 $O(N^2)$ 降为 $O(N)$,以提高变化磁场中耦合损耗计算效率;由于磁场的不均匀性,算法简单采用均匀化的网格,使得模拟计算值与实测值相差较大,还缺少对磁滞损耗计算的研究。

根据作者等开展的基于应变的导体结构数值设计研究[13];由多变量制约所建立的 CICC 导体模拟设计模型,获得更为合理的导体结构[14];以及通过傅里叶变换对组分积分求和获得导体损耗[15]等前期研究工作。发现在 CICC 导体 AC 损耗计算中,缺乏应变效应对 AC 损耗影响的试验探讨与仿真分析:一方面,在应变影响下, Nb_3Sn 基于 CICC 导体的临界特性,特别是临界电流密度受应变的影响;另一方面, Nb_3Sn 导体因应力使得超导电缆的空隙率、股线空间位置以及接触情况等的改变,导致耦合损耗时间常数的畸变。这使磁滞损耗和耦合损耗发生难以预料的变化,对应变下 Nb_3Sn 导体的 AC 损耗机理进行研究是不可回避的问题。

为此,本文用应变效应下的临界电流数学模型,把应变下临界电流密度引入到磁滞损耗计算,对耦合损耗计算中的导体特征参数表达,诸如扭距长度、有效电阻率、股线接触和空隙率等考虑应变效应,然后获得 CICC 导体的 AC 损耗计算技术。以此加强对复杂动态磁场中 AC 损耗计算理论的理解,了解 Nb_3Sn 导体在快速励磁、等离子体放电及破灭等恶劣条件下的运行机制。

2 应变效应计算模型

2.1 应变作用模型

目前有几种描述 Nb_3Sn 应变敏感性模型。第一种是 1980 年 Ekin 提出的幂律模型[16],它主要描述 Nb_3Sn 化合物股线临界特性对应变依赖性,模型是基于轴向拉应变测试结果形成的。不过幂律是经验描述,不能解释自然的三维应变以及较大线性纵向压缩应变,所以它只适用于有限应变区。

第二种是偏应变模型。它是 Ten Haken 对依靠轴向应变的上临界场的近似线性估计,即偏离幂律特性[17]。相对幂律模型,它的偏离发生于较大压缩应变值;该模型不能解释三维应变和较大压缩应变的线性关系,仅对压应变区间是合理的。

第三种是 Markiewicz 的全不变应变分析[18]。该模型基于临界温度依靠应变假设,采用 Eliashberg 理论和应变势能函数关系,把临界温度依靠的应变与应变引起的声子频谱变化联系起来。该模型主要用应变势能函数描述谐波与非谐波的作用。它能解释临界温度随轴向应变的变化,但不能描述标定临界电流密度的上临界场。

综合上面应变模型,由体积钉扎力 $F = |J \times B|$,给定条件的磁场强度 B 以及应变势能函数,还有 CICC 导体焓值估计计算公式,可获得应变下 Nb_3Sn 临界电流密度经验表达的描述[19]。

$$J_C(B, T, \varepsilon) = \frac{C}{B} S(\varepsilon) (1-t^{1.52}) (1-t^2) h^{0.5} (1-h)^2 \quad (1)$$

$$C = \frac{C_0 [B_{C2M}^*(0)]^2}{k_{1m}(0)} \quad (2)$$

$$t = \frac{T}{T_C^*(\varepsilon)} \quad (3)$$

$$h = \frac{B}{B_{C2}^*(T, \varepsilon)} \quad (4)$$

$$T_C^*(\varepsilon) = T_{CM}^*(0) S(\varepsilon)^{1/3} \quad (5)$$

$$B_{C2}^*(T, \varepsilon) = B_{C2M}^*(0) S(\varepsilon) (1-t^{1.52}) \quad (6)$$

式中, $J_C(B, T, \varepsilon)$ 为应变下的临界电流密度; B 为磁场强度; T 为温度; $S(\varepsilon)$ 是最大磁场处重标准化参数,它与轴向应变实验的峰值关(具体参见文献[20]); ε 为纵向上 Nb_3Sn 超导丝的总应变; t 和 h 为温度和磁场的衰减率; $B_{C2}^*(T, \varepsilon)$ 为依靠温度和应变的上临

界磁场; $T_C^*(\varepsilon)$ 为依靠应变的临界温度; 微观结构参数 $k_{1m}(0)$ 以及参数 $C_0[B_{C2M}^*(0)]$ 、 $B_{C2M}^*(0)$ 和 $T_{CM}^*(0)$ 是在不同实验条件下所获得经验估计值。

2.2 应变表达

由于实际中超导电缆上应变作用的复杂性, 为简化计算, 假设作用在 Jacket (外壳、导管) 上的应变全部传给 CICC 导体, 可获得由三个部分组成的 Nb₃Sn 导体有效应变表达^[13]。

$$\varepsilon = \varepsilon_{op} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{other} \quad (7)$$

式中, ε_{op} 是导体运行时应变, 由 Lorentz Force 在轴向引起; ε_{th} 为零电流的热应变, 是由热载荷 (热胀冷缩) 造成; ε_{other} 是加工制造等原因带来的应变, 一般因导体结构而异。

由于 CICC 导体在加工和绞缆等制造过程中产生的应变, 它具有随机和不确定性, 对应式 (7) 中的 ε_{other} , 一般由经验概率估计而得; 热反应 (包含热处理) 温度 (约 293K) 到 4.2K 或 4.5K 低温运行时, Nb₃Sn 化合物不同组分、以及电缆与导管间不同的热胀系数, 导致的应变对应式 (7) 中的 ε_{th} , 一般可以计算获得; 不同运行电流与磁场强度的电动势 ($I \times B$) 形成的应变对应式 (7) 中的 ε_{op} , 也可计算得到。工程设计中它们可以在一定假设、简化和限制条件下, 采用有限元方法来模拟导体的应力应变情况; 实验测试中一般采用 WUCD (warm up/cool down) 的热载荷和不同周期下横向电磁载荷 ($I \times B$) 的组合来模拟应变作用。

综合考虑 ITER-TF 和 CS 型 CICC 导体在瑞士的 SULTAN 和荷兰 Twente 大学的 TARSIS 测试结果, 以及目前测试的应变区间变化情况, 作为上述应变的 ε 一般经验取值为 -1.2%~0.6%。

3 应变下 AC 损耗计算模型

3.1 AC 损耗理论基础

对处于时变磁场或快速励磁的 CICC 导体, 会产生 AC 损耗, 它主要包括磁滞损耗和耦合损耗两部分。

由于 CICC 的超导丝处在变化磁场中引发感应电流, 使磁力线运动, 导致磁通克服钉扎力做功而消耗能量, 产生磁滞损耗。对 Nb₃Sn 导体, 主要由晶粒边界形成钉扎中心, 这导致应变对临界参数, 特别是对临界电流和钉扎力的作用; 应变效应的存在, 使 Nb₃Sn 基 CICC 导体的磁滞损耗有别于 NbTi 计算。

感应电流在超导丝的有阻涂层和铜基体中流动, 导致能量消耗, 产生耦合损耗。由于应变作用, 使得 Nb₃Sn 超导电缆的空隙率和接触状况 (电阻) 等发生改变, 引发耦合损耗时间常数产生不可预知的变化, 从而使耦合损耗计算不同于 NbTi 情况。

3.2 磁滞损耗计算模型

在计算磁滞损耗时, 可以把股线中众多的超导丝假设为圆柱体; 同时对于瞬变磁场, 特别是快速励磁和等离子体放电等情况; 外电磁场变化通过逐段细分获得, 它是分段线性的结果。则电场为

$$E = B_c(x - x_p) \quad (8)$$

式中, B_c 为超导丝外表面的磁场强度; x 为坐标值; x_p 为渗透深度。

根据坡印廷定理 (Poynting's theorem), 在时变电场中存在耗散能量的介质 (复合超导丝), 由传输电流和电场强度的积, 对局域体积的积分获得损耗功率, 则磁滞损耗功率 (单位体积) 为

$$\begin{aligned} P_H(\varepsilon) &= \frac{1}{\pi} \int_{x_p}^{D/2} J_C(B, T, \varepsilon) B_c(x - x_p) 2\pi x dx \\ &= J_C(B, T, \varepsilon) B_c \left(\frac{D^3}{12} - \frac{D^2}{4} x_p + \frac{1}{3} x_p^3 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, π 为圆周率; D 为超导丝直径; $J_C(B, T, \varepsilon)$ 为考虑应变后的临界电流密度 (具体见式 (1))。

3.3 耦合损耗计算模型

由于超导电缆是股线经过多级换位绞缆而成的, 在计算耦合损耗时, 整个电缆的有效扭距长度和横向电阻率等参数不同于股线的情况。可通过简化处理, 推导出适用于 CICC 导体的计算公式, 获得适用于超导电缆高精度计算的耦合损耗公式。

在计算耦合损耗时, 主要关心快速励磁以及等离子体放电和破灭等极端情况。耦合损耗功率 (单位体积) 为

$$P_C(\varepsilon) = \frac{2\pi^2 k B_{\perp}^2 n\tau}{\mu_0} \quad (10)$$

式中, k 为磁场变化频率; B_{\perp} 为横向外磁场; $n\tau$ 是耦合损耗时间常数; μ_0 为真空磁导率。

其中 $n\tau$ 的计算由下面公式计算:

$$n\tau = \sum_{i=1}^N n_i \tau_i \quad (11)$$

式中, $n_i \tau_i$ 表示耦合损耗时间在第 i 级绞缆时的增加值, 采用如下计算公式:

$$n_i \tau_i = \frac{\mu_0}{2\rho_{i(\varepsilon)}} \left(\frac{L_i}{2\pi} \right)^2 \quad (12)$$

式中, $\rho_{i(\varepsilon)}$ 、 L_i 分别为第 i 级子缆中的有效电阻率、有效扭距长度。

第 i 级子缆有效扭距长度的计算参见文献[20]; 有效电阻率 $\rho_{i(\varepsilon)}$ 是在已有算法基础上, 考虑应变后加以权重系数后获得的。耦合损耗能量通过耦合损耗功率对时间积分获得。

由此获得总 AC 损耗功率

$$P_{ALL}(\varepsilon) = P_H(\varepsilon) + P_C(\varepsilon) \quad (13)$$

4 实验结果与分析

4.1 测试用 CICC 导体

为拟合计算和测试分析 ITER 导体的 AC 损耗, 实验中 CICC 导体采用的为: 西部超导公司 (Western Superconducting Technologies Company, WST) 提供的 Nb_3Sn 股线, 由中科院等离子体物理研究所 (Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, CASIPP) 为 IETR 制造和提供的导体 (the Chinese Toroidal Field Sample, CNTF), 具体导体结构如图 1 所示。

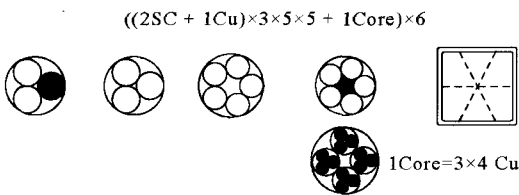


图 1 CICC 导体结构

Fig.1 Configuration of CICC

它的一级子缆是由 1 根纯铜股线和 2 根 Nb_3Sn 股线构成; 二级子缆包含 3 根一级子缆; 三级子缆含有 5 根二级子缆; 再由 1 根铜缆 (3×4 根纯铜股线) 和 5 根三级子缆形成四级子缆; 接着由 6 根四级子缆制成五级子缆, 最后穿管和挤压形成 CICC 导体结构。

相对于以前制造和测试用的模型线圈导体 TFMC, CNTF 导体的特点是具有较长的扭距、较小的空隙率以及不超过 50% 的子缆缠绕率。这样由于扭距的变化、空隙率等不同, 加之电动力和低温运行造成的应变对 Nb_3Sn 股线的影响, 使股间交叉接触点数和电缆位移产生变化, 导致 CNTF 的股间电阻 R_c 、耦合损耗时间常数 $n\tau$ 、甚至电缆的刚度发生了不可预料的畸变。

4.2 接触电阻与耦合损耗时间测试

为研究应变对接触电阻和耦合损耗时间常数等的影响, 通过在 SULTANT 对 CNTF 的电阻 R_c (四点法) 和时间常数 $n\tau$ 进行了测量, 采用周期载荷来模拟。

具体测量方法和顺序如下: 首先是在不加载和 4.2K 下, 测量电阻 R_c 、时间常数 $n\tau$ 和来自磁化的损耗。接着对导体逐渐增加载荷到设定的最大值 (导体为 580kN/m), 在每一加载阶段, 测量电缆的位移、时间常数 $n\tau$ 和三角股间电阻 R_c ; 在满载情况下, 重复测量电阻 R_c 、时间常数 $n\tau$ 和 AC 损耗。然后逐渐卸载, 同时测量位移、时间常数 $n\tau$ 和电阻 R_c 。对自动加载周期和选择性加载周期, 同样重复测量程序。

图 2 显示了第一级子缆到最后一级子缆 (一级子缆~末级子缆) 股间接触电阻 R_c 随周期载荷的变化, 从图 2 的全载情况下可以发现: 电阻 R_c 在加载开始时增加, 超过 1 000 满载周期后出现了饱和; 在零载下没有观察到饱和现象, 即股间接触电阻 R_c 随周期基本呈增加趋势。

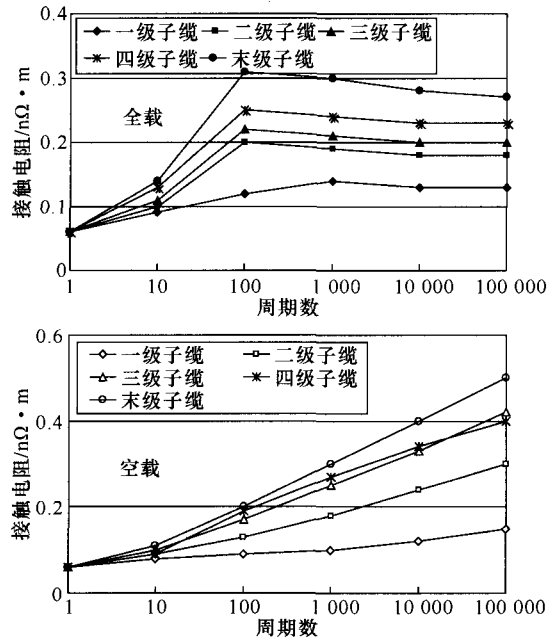


图 2 接触电阻 R_c 随载荷周期的变化

(上图为满载, 下图为空载)

Fig.2 Contact resistance versus load cycles

(Top is full load, bottom is zero load)

图 3 显示了在空载和满载下, 测试导体的耦合损耗时间 $n\tau$ 随周期变化情况。从图 3 可以观察到: 开始时耦合时间常数 $n\tau$ 较高, 约为 680ms; 在开始的 100 周期内 $n\tau$ 减小的比较明显; 随后出现平坦缓慢的变化; 最后在零载和满载的情况下, 分别饱和于 200ms 和 250ms。

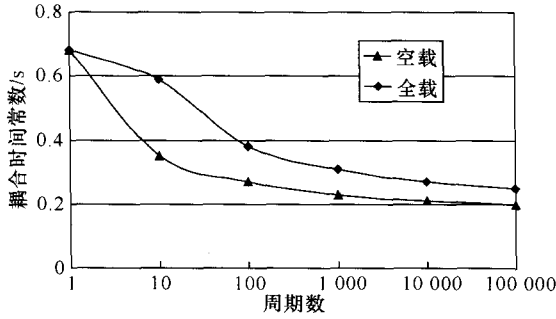


图3 耦合时间常数随周期载荷变化

Fig.3 Coupling time constant versus load cycles

4.3 损耗计算与比较分析

AC 损耗功率采用两种方法计算。第一种采用前面 3.2 和 3.3 部分中的公式来计算总损耗。在计算耦合损耗时间和接触层（电阻）表征时，已经利用 4.2 的实验测试结果，通过考虑权重进行实际 AC 损耗功率计算。

第二种是用经典算法获得磁滞功率和耦合损耗功率^[20]；通过丝线中磁化的变化，来计算磁滞损耗功率的表达式

$$P_H = 2J_C DB(3\pi)^{-1} \tag{14}$$

式中， J_C 为临界电流密度（取 $J_C(B, T, \epsilon)$ 计算值）。

耦合损耗功率的表达式为。

$$P_C = n\tau \dot{B}^2 \mu_0^{-1} \tag{15}$$

总的 AC 损耗功率为

$$P_{ALL} = P_H + P_C \tag{16}$$

根据励磁电流频率，由经典算法（给定磁场变化率 11T/s）与应变算法获得的 AC 损耗功率结果比较如图 4 所示（也包括实际测量的 AC 损耗功率）。

计算应变算法中磁滞损耗功率考虑并用了应变下的临界电流密度（ J_C 即为 $J_C(B, T, \epsilon)$ ）；在耦合损耗功率中考虑应变对接触电阻和损耗时间常数的影响。

在图 4 中，经典算法的损耗功率位于三种方法的最上面；并随着频率的增加，计算和测试值在逐渐靠近。在 0.1~10Hz 的范围内，经典算法的损耗功与比应变算法之间的最大差值为 9.3W/m³。

通过对图 4 中 CICC 导体单位体积 AC 损耗功率的比较后发现：应变算法获得的 AC 损耗功率值比经典算法的小，而实验测量获得的 AC 损耗功率值一般也小于经典算法，这说明应变算法更接近工程实际值的大小。另外在低频的情况下，经典算法和应变算法差值较大；在相对高的频率下，二者几

乎接近。这进一步显示在快速励磁、特别是等离子体放电以及等离子体破灭等情况下，应变算法和经典算法是相吻合的。

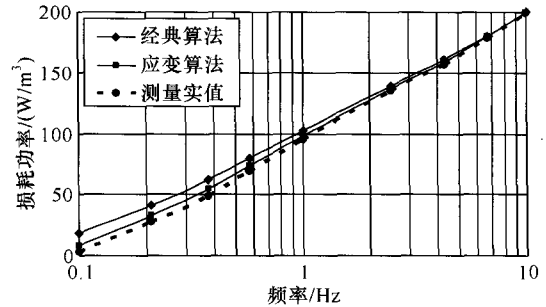


图4 AC 损耗功率结果比较

Fig.4 Comparison of result of AC loss

由应变计算获得的 $P_{ALL(\epsilon)}$ 和用经典算法获得的 P_{ALL} ，可获得 AC 损耗的相对误差。

$$P_{error} = \frac{P_{ALL} - P_{ALL(\epsilon)}}{P_{ALL}} \tag{17}$$

通过计算分析发现，应变计算公式与经典算法获得的 AC 损耗功率之间的相对误差随励磁电流频率成近似线性变化，但随着频率的增加而减小。整体在 0~13% 之间变化，具体如图 5 所示。在频率为 0.8~0.9Hz 之间，AC 损耗的相对误差发生了比较大的变化。其中的点划线表示相对误差的变化趋势。

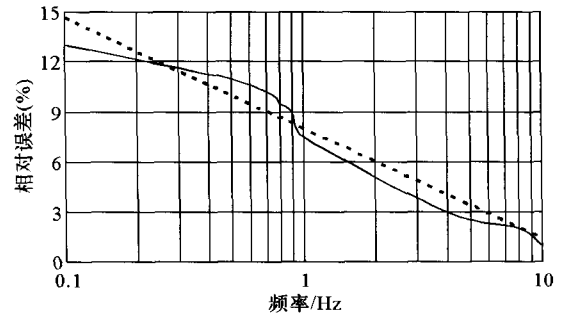


图5 AC 损耗功率相对误差变化情况

Fig.5 Relative error of AC Loss

5 结论

在快速励磁以及瞬变磁场中，进行了宽应变区间 AC 损耗计算技术的探索，构建应变作用下的临界电流方法，把应变作用下的临界电流密度引应用磁滞损耗功率计算；对耦合损耗功率计算，在考虑应变效应后，获得 CICC 导体耦合损耗计算模型。

由测试和模拟分析可知：在快速励磁激发等离子体、等离子体放电和破灭等情况，考虑应变作用

的 AC 损耗功率算法更接近工程实际值；对应变作用算法损耗功率和经典算法的相对误差计算，发现基于应变方法的相对误差变化小于 15%。

参考文献

- [1] Hoenig M O. Internally cooled cabled superconductors [J]. *Cryogenics*, 1980, 20(7): 373-389.
- [2] Dresener L. Twenty years of cable-in-conduit conductors: 1975-1995[J]. *Journal of Fusion Energy*, 1995, 14(1): 3-12.
- [3] Seeber B. Hand book of applied superconductivity [M]. London: Institute of Physics Publication, 1998.
- [4] Ciazynski D. Review of Nb₃Sn conductors for ITER [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(2): 488-497.
- [5] Liu B, Wu Y, Liu F, et al. Axial strain characterization of the Nb₃Sn strand used for China's TF conductor[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(1): 1-4.
- [6] Zhang P X, Liang M, Tang X D, et al. Strain influence on J_c behavior of Nb₃Sn multifilamentary strands fabricated by internal tin process for ITER[J]. *Physica C*, 2008, 46(15): 1843-1846.
- [7] Bruzzone P. AC losses and stability on large cable-in-conduit superconductors [J]. *Physica C*, 1998, 310(1-4): 240-246.
- [8] 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 [J]. *Nuclear Science and Technology*, 2003, 14(1): 76-82.
- [9] 王秋良. 高磁场超导磁体科学[M]. 北京: 科学出版社. 2008.
- [10] Bottura L, Bruzzone P, Lister J. B, et al. Computation of AC losses in the ITER magnets during fast field transients[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2007, 17(2): 2438-2441.
- [11] Egorov S. AC coupling losses in superconducting multistage cables with and without additional co-twisted copper strands [J]. *Physica C*, 1998, 310(1-4): 272-276.
- [12] Van Lanen E P A, Van Nugteren J, Nijhuis A. Full-scale calculation of the coupling losses in ITER size cable-in-conduit conductors [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2012, 25(2): 138-143.
- [13] 蒋华伟, 武松涛. 基于应变 CICC 导体模拟设计模型研究[J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1348-1338.
Jiang Huawei, Wu Songtao. Research of simulation design model for CICC based on strain[J] *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1348-1338.
- [14] 蒋华伟, 武松涛, 成俊生. 管内电缆导体结构模拟设计优化模型[J]. *科学通报*, 2011, 56(6): 440-445.
Jiang Huawei, Wu Songtao, Cheng Junsheng. Optimization model of a structural simulation design for a CICC [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(27): 2978-2983.
- [15] 蒋华伟, 武松涛. 应变下管内电缆导体交流损耗计算模型[J]. *中国科学: 计算科学*, 2012, 42(5): 576-583.
Jiang Huawei, Wu Songtao. Calculation model of AC loss for CICC (cable-in-conduit conductor) based on strain [J]. *Science China Technology Science*, 2012, 55(4): 1132-1139.
- [16] Ekin J W. Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part I: Basic relationship and application to Nb₃Sn conductors [J]. *Cryogenics*, 1980, 20(11): 611-624.
- [17] Ten Haken B, Godeke A, Ten Kate H H J. The influence of compressive and tensile axial strain on the critical properties of Nb₃Sn conductors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 1995, 5(2): 1909-1912.
- [18] Markiewicz W D. Invariant strain analysis of the critical temperature T_c of Nb₃Sn [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2005, 15(2): 3368-3371.
- [19] Godeke A, Ten Haken B, Ten Kate H H J, et al. A general scaling relation for the critical current density in Nb₃Sn[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2006, 19(10): 1-35.
- [20] 方进. HT-7U 管内电缆导体的稳定性理论及实验研究. 博士学位论文[D]. 合肥: 中国科学院等离子体物理研究所, 2002.

作者简介

蒋华伟 男, 1970 年生, 博士, 教授, 研究生导师。研究方向为超导电缆仿真设计。

李国平 男, 1978 年生, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为人工智能。