

基于高温超导带材的三通道导体载流特性的仿真研究

陈勇¹, 罗荣华¹, 羊新胜^{1†}, 郑鹏飞², 徐敏², 赵勇¹

1. 西南交通大学磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 超导与新能源研究开发中心, 成都 610031

2. 核工业西南物理研究院, 成都 610225

收稿日期: 2020-01-07; 接收日期: 2020-07-20

【摘要】 本文基于三通道扭曲堆叠导体和准各向同性导体, 提出了三通道准各向同性导体。在有限元仿真软件中使用自洽模型对两种导体进行建模, 分析并对比了两种三通道导体的临界电流、临界电流各向异性、工程电流密度与导体半径之间的关系。仿真结果表明三通道准各向同性导体在背景场条件下具有使用价值, 同时也为提高两种三通道导体工程电流密度提出了建议。

关键词: 有限元仿真, 三通道导体, 临界电流, 临界电流各向异性, 工程电流密度

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.02.002

The Current Carrying Characteristics for 3-channel HTS conductors

CHEN Yong¹, LUO Ronghua¹, YANG Xinsheng^{1†},
ZHENG Pengfei², XU Min², ZHAO Yong¹

1. Key Laboratory of Magnetic Levitation, Technologies and Maglev Trains (Ministry of Education),
Superconductivity and New Energy R&D Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China

Received date: 2020-01-07; accepted date: 2020-07-20

【Abstract】 Based on 3-channel twisted stacked-tape cable conductor and quasi-isotropic strand, this paper proposes 3-channel quasi-isotropic conductor. These kinds of conductors were modeled using self-consistent models in the finite element simulation software, and the relationships between the critical current, critical current anisotropy, engineering current density and conductor radius of the two 3-channel conductors were analyzed and compared. The simulation results show that the 3-channel quasi-isotropic conductor is useful under background field conditions, and it is also proposed to improve the engineering current density of these 3-channel conductors.

Keywords: Finite element simulation; 3-channel conductor; critical current, critical current anisotropy; engineering current density

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.02.002

Reference method: CHEN Yong, LUO Ronghua, YANG Xinsheng, ZHENG Pengfei, XU Min, ZHAO Yong,
Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0068 (2020)

[†] xsyang@swjtu.edu.cn

1 引言

近年来,以高温超导材料为基础的高温超导带材大规模商品化为超导技术普及提供了基础。尽管高温超导材料的载流能力远高于铜、铝等金属,但单根高温超导带材的载流能力往往不足以满足实际工程应用的需求。因此,研究者将多根高温超导带材并联、制成高温超导导体使用^[1]。通过将多根高温超导带材制备成为高温超导导体,一方面可使导体临界电流增大,另一方面也可人为地对排列方式进行优化,降低导体的临界电流各向异性^[2]。此外,高温超导导体外部通常覆盖有用不锈钢等材料制成的铠甲,能够提升超导导体力学性能,减少应用限制^[3-4]。因此,高温超导导体是超导技术应用的一种重要载体,具有广阔的应用前景且已成为国际上一个研究热点^[1,5]。

目前,研究者已经开发出以 CORC 导体(Conductor On Round Core)^[6-9]、Q-IS 导体(准各向同性导体,Quasi-Isotropic Strand)^[10-12]、TSTC 导体(扭曲堆叠导体,Twisted Stacked-Tape Cable)^[13-15]等为代表的一系列高温超导导体,这些导体都有自己独特的优势。但性能更优的超导导体可为工程应用提供更多的可能,因此,研究者仍在不断探寻性能更优的高温超导导体。2014 年, TSTC 导体提出者 Makoto Takayasu 在 TSTC 导体基础上提出三通道扭曲堆叠导体(三通道 TSTC 导体,3-channel twisted stacked-tape cable conductor)^[16],意在通过改变导体的排布进而提升导体的性能。通过实验,证实了该新结构的导体相较于 TSTC 导体具有临界电流大、临界电流各向异性小等优点。

华北电力大学王银顺教授团队提出的 Q-IS 导体通过结构优化使导体拥有高临界电流的同时降低了临界电流各向异性,是一种具备可观应用前景的导体^[11-12]。因此,本文基于现有的三通道 TSTC 导体进行拓展,结合综合性能较优的 Q-IS 导体,提出一种全新结构的三通道导体,即三通道 Q-IS 导体(三通道准各向同性导体)。因高温超导导体的载流性能直接影响导体选型,对其载流性能进行研究可为工程应用提供数据参考。在此背景下,本文在有限元仿真软件中使用自洽模型对导体进行二维建模仿真,研究两种三通道导体的临界电流大小与临界电流各向异性差异。通过改变三通道 TSTC 导体和三

通道 Q-IS 导体的半径,研究两种导体不同半径对应的导体临界电流和工程电流密度。最终为三通道导体实际应用提供数据参考。

2 三通道导体几何结构

本文所研究的三通道 TSTC 导体由三个 TSTC 子导体组成,每个子导体设计成由 40 根 SUPER-POWER 的 SCS4050 高温超导带材紧密堆叠而成^[7],单根 SCS4050 高温超导带材临界电流为 100 A,横截面几何尺寸为 4 mm×0.1 mm,3 组相同的 TSTC 导体均匀排列成三通道 TSTC 导体,导体结构如图 1 所示。相似地,三通道 Q-IS 导体由三个 Q-IS 子导体组成,三个 Q-IS 子导体位置与三通道 TSTC 导体的子导体位置重合。每一个 Q-IS 子导体可以看成由 4 组堆叠导体组成,每组堆叠导体由 20 根几何尺寸为 2 mm×0.1 mm 的高温超导带材紧密堆叠而成^[12],显然,三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体横截面积相等。本文假定 Q-IS 导体使用的高温超导带材除尺寸参数不同于 SCS4050 外,其它参数均相同,因此导体中单根高温超导带材临界电流为 50 A。导体横截面如图 2 所示

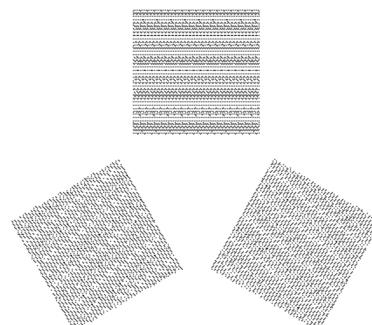


图 1 三通道 TSTC 导体横截面示意图

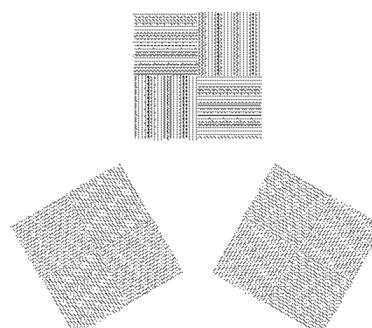


图 2 三通道 Q-IS 导体横截面示意图

3 数值模型

本文意在探讨两种三通道导体的临界电流与临界电流各向异性差异、导体尺寸对导体工程电流密度的影响。因此，本文在有限元仿真软件中建立的模型是二维简化模型，只对高温超导带材中超导层的部分进行建模，其它部分均采用空气域替代，不考虑均流特性，忽略了扭绞产生的应力应变对导体临界电流的影响。

本文选取自洽模型对导体临界电流进行仿真。众多研究表明，自洽模型能够很好地应用于导体临界电流计算^[17-18]。现简单介绍自洽模型。高温超导材料电场强度 E 和电流密度 J 的关系可以用 E - J 幂指数方程表示：

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c(\mathbf{B})} \right)^n \quad (1)$$

式 1 中， E_0 表示超导材料通过的电流密度达到临界电流密度时对应的电场强度，为 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 。 n 为高温超导材料的特征值。式中 $J_c(\mathbf{B})$ 为：

$$J_c(\mathbf{B}) = \frac{J_{c0}}{\left(1 + \sqrt{\frac{(k \times B_{para})^2 + (B_{parp})^2}{B_c}} \right)^b} \quad (2)$$

式 2 中， $J_{c0} = 2.5 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ ， $B_c = 0.035$ ， $k = 0.25$ ， $b = 0.6$ ^[19-20]， B_{para} 和 B_{parp} 分别表示高温超导带材横截面磁场的切向分量和法向分量。

通过引入的辅助变量 P ，式 1 可以改写为：

$$\mathbf{J} = J_c(\mathbf{B}) P \quad (3)$$

$$P = \frac{E}{E_0} \left| \frac{E}{E_0} \right|^{\frac{1}{n}-1} \quad (4)$$

结合式 3 及 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 即可将安培定律写成下式：

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} = J_c(\mathbf{B}) P \frac{\mathbf{J}}{J} \quad (5)$$

本文的导体模型往往具有多个空间相互独立而电磁场相互联系的区域，需对每一个区域添加独立的辅助变量 P 。当辅助变量 P 对应超导区域电流达到其所在电磁环境下最大值时， P 的值为 1。此时，仿真程序停止计算并输出结果。最后，对所有超导区域的电流密度进行积分即得导体的临界电流。如前所述，尽管组成三通道 Q-IS 导体的高温超导带材并不是 SCS4050 高温超导带材，但是出于控制变量的考虑而忽略了其中的差异，将式 2 中的参数统一。

4 结果与分析

在有限元仿真软件中对三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体进行二维建模仿真，研究两种导体在不同条件下的临界电流，由此进行对比。为了更好地探究三通道导体的临界电流差异，本文在有限元仿真软件中构建了对应子导体的仿真模型，即建立 TSTC 导体与 Q-IS 导体的仿真模型并进行计算。

4.1 三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体临界电流对比

图 3-a、b 表示两种三通道导体在自场条件下的磁场分布情况，三通道导体与对应子导体的临界电流如表 1 所示。

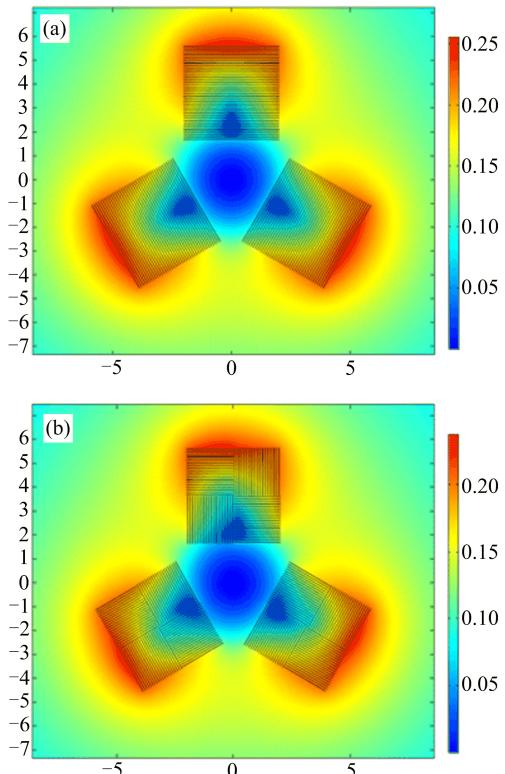


图 3 三通道 TSTC(a)与 Q-IS(b)导体自场分布图

表 1 导体自场临界电流

导体	临界电流
TSTC 导体	1926.86 A
Q-IS 导体	1959.82 A
三通道 TSTC 导体	5468.51 A
三通道 Q-IS 导体	5051.69 A

从表 1 可知，TSTC 导体临界电流略小于 Q-IS

导体。但是,本文通过仿真得出的结果却显示三通道 TSTC 导体临界电流大于三通道 Q-IS 导体,前者临界电流比后者大 8.25%。出现这一现象可能的原因是两种三通道导体具有的几何结构不同。首先,高温超导带材的临界电流大小受外部磁场的影响,由式 2 可知高温超导带材截面上不同的磁场分量对其临界电流衰减的贡献并不一致,磁场切向分量的贡献小于法向分量;其次,分析导体几何结构可知,Q-IS 导体由 4 部分堆叠导体组成,相邻两部分的堆叠导体呈相互垂直进行排列;TSTC 导体则不存在该现象,其高温超导带材均为平行排列。在三通道导体中,任一子导体均将受相邻两个子导体产生的磁场影响。因此,三通道 Q-IS 导体独特的几何结构使其受磁场的影响大于三通道 TSTC 导体。综上,三通道 TSTC 导体临界电流大于三通道 Q-IS 导体。

4.2 三通道 TSTC 导体与三通道 Q-IS 导体临界电流各向异性对比

两种三通道导体均包含 3 组子导体,从结构上不难看出两者均具有 120° 旋转对称关系。故在计算两者临界电流各向异性时,施加外磁场的大小为 0.5 T,选取 7.5° 为间隔,角度从 0° 到 240° 均匀变化。通过计算在不同外磁场角度下导体的临界电流,得出两种导体临界电流变化如图 5 所示,图 4-a、图 4-b 为两种导体在外磁场为 0.5 T、角度为 0° 下的磁场分布云图。

由图 5 可见,两种三通道导体的临界电流都随外磁场变化而呈现周期性变化,变化周期为 120° 。从图 1、图 2 可知两种三通道导体结构都具有 120° 旋转对称性,因此,两者的临界电流变化规律符合导体结构对应关系。根据图 6 可见,在 2 周期内,即外磁场角度从 0° 向 240° 变化过程中,三通道 Q-IS 导体临界电流衰减率几乎均小于三通道 TSTC 导体,仅在极个别角度时其临界电流衰减率略微大于三通道 TSTC 导体。因此三通道 Q-IS 导体具有优于三通道 TSTC 导体的临界电流各向异性。

4.3 三通道 TSTC 导体与三通道 Q-IS 导体工程电流密度对比

如前所述,高温超导带材临界电流大小受磁场影响,而磁场大小与两子导体之间的距离平方成反比。如图 7,通过改变子导体底边到三通道导体中心的距离 d 即可改变子导体间的距离,从而改变其任一子导体受到的磁场影响,进而改变三通道导体临

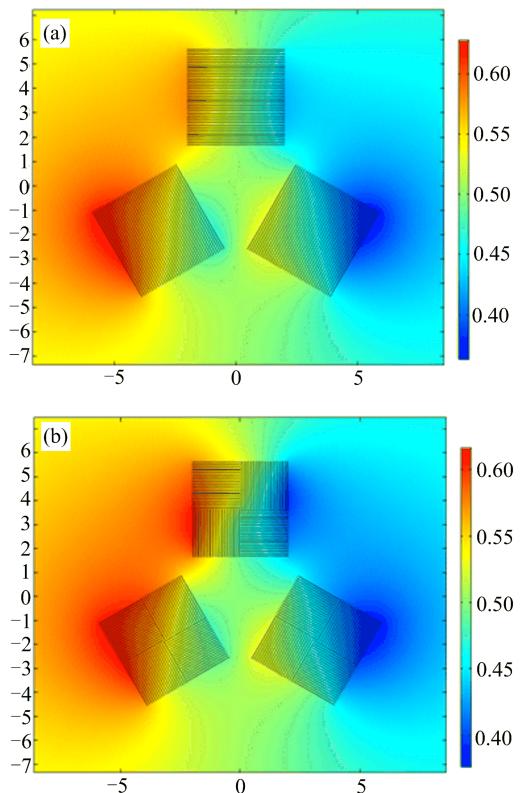


图 4 外磁场 0.5 T、角度 0° 下三通道 TSTC 导体
(a) 与 Q-IS 导体(b)磁场分布云图

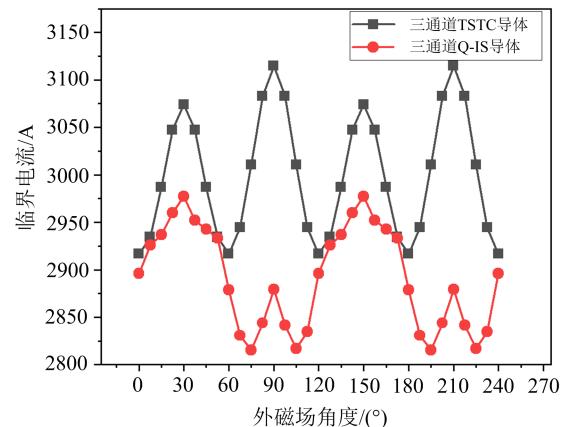


图 5 外磁场下三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体临界电流. 假设相接圆为成品导体横截面,便有用于工程电流密度计算的半径 r 和横截面积 S .

基于子导体不能重合的原则, d 存在最小值 d_{min} ,通过几何计算可知,最小值 $d_{min} = 1.1547$ mm。因此,本文通过在极小值 d_{min} 基础上加上常数 Δd 改变导体的几何尺寸,最后进行仿真。仿真结果如图 8、图 9、图 10 所示。

由图 8 可知,三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体临界电流都会随着 d 值增大而逐渐增大。由图 9 可见,相较于 $\Delta d = 0.1$ mm 时的起始状态,三通道

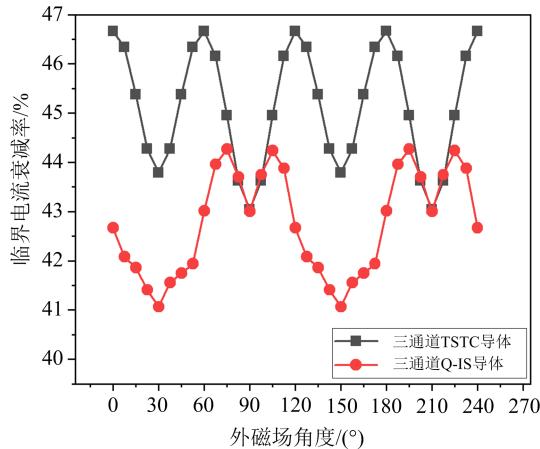


图 6 外磁场下三通道 TSTC 导体和三通道 Q-IS 导体临界电流衰减率

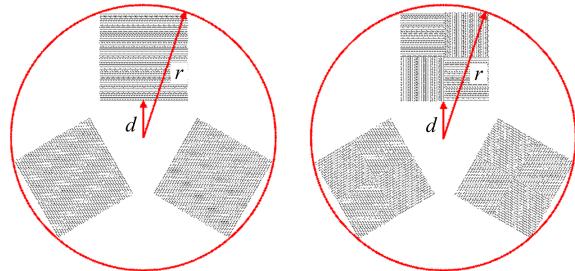


图 7 三通道导体几何尺寸示意图

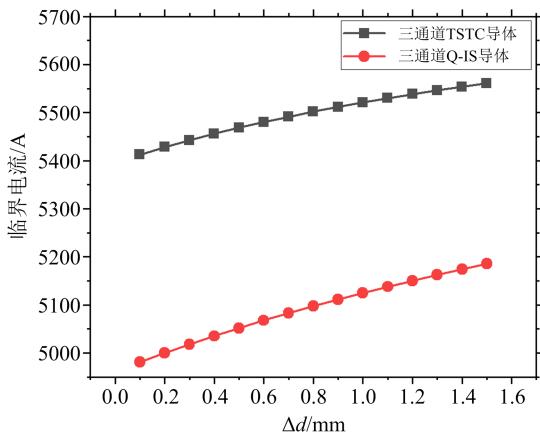


图 8 三通道导体临界电流随 d 值增量的变化

Q-IS 导体临界电流增量大于三通道 TSTC 导体, 两者之差随 Δd 增大而增大。

从图 10 可见, 两种导体的工程电流密度都会随 Δd 增大而减小。换言之, 两种三通道导体工程电流密度均随导体半径增大而减小。因此, 若工程应用要求上述三通道导体拥有尽可能高的工程电流密度, 可以在保证机械加工可行的前提下尽可能缩小导体半径以增大导体工程电流密度。

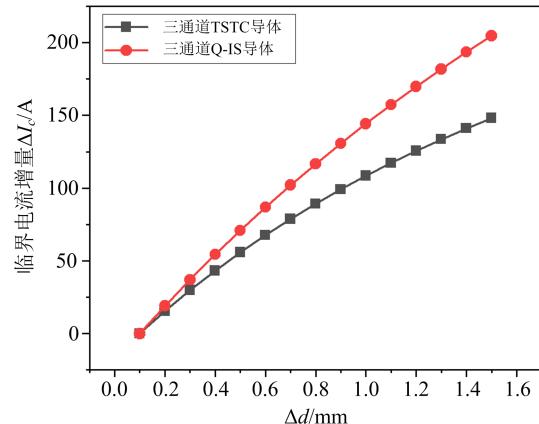


图 9 三通道导体临界电流相较于 $\Delta d = 0.1$ mm 时的增量

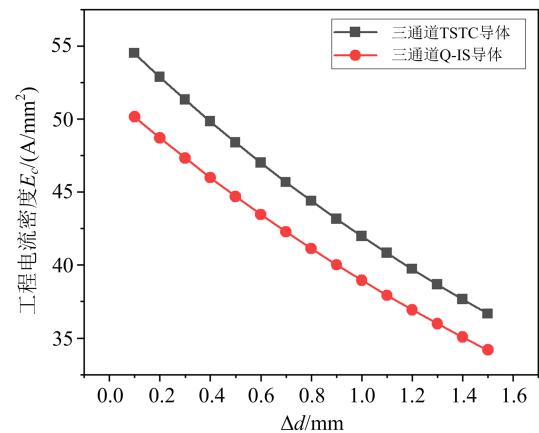


图 10 三通道导体工程电流密度随 d 值增量的变化

5 结 论

本文基于三通道 TSTC 导体进行拓展, 提出一种基于 Q-IS 导体的三通道 Q-IS 导体, 通过在有限元仿真软件中使用自洽模型对导体进行二维建模仿真, 基于仿真分析得出以下结论:

1. Q-IS 导体相较于 TSTC 导体具有更高的临界电流, 但由于三通道 Q-IS 导体独特的几何结构特征使其任一子导体受到其它子导体产生的磁场影响大于三通道 TSTC 导体, 因此三通道 Q-IS 导体的临界电流小于三通道 TSTC;
2. 外磁场角度变化过程中, 三通道 Q-IS 导体临界电流衰减率几乎全小于三通道 TSTC 导体, 仅在极个别角度时略微大于三通道 TSTC 导体。因此三通道 Q-IS 导体具有优于三通道 TSTC 导体的临界电流各向异性;
3. 两种三通道导体临界电流均随着导体半径增

大而增大;两种三通道导体的工程电流密度均随着导体半径增大而逐渐减小.为使导体拥有更高的工

程电流密度,可在保证机械加工可行性的前提下尽可能缩小导体半径.

参 考 文 献

- [1] 王银顺. 基于第二代高温超导带材的高载流超导体研究进展[J]. 电工电能新技术, 2017, **36**(11): 21-35.
- [2] 赵翔, 胡南南, 王达达, 等. 高温超导带材临界电流各向异性的试验研究[J]. 低温与超导, 2013, **41**(12): 46-50.
- [3] Marzi G D, Allen N C, Chiesa, et al. Bending tests of HTS cable-in-conduit conductors for high-field magnet application [J]. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2016, **26**(4): 4801607.
- [4] M. Breschi, M. Casali, L. Cavallucci, et al. Electrothermal Analysis of a Twisted Stacked YBCO Cable-in-Conduit Conductor[J]. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2015, **25**(3): 4800505.
- [5] 金建勋, 游虎, 姜在强, 等. 高温超导电缆发展及其应用概述[J]. 南方电网技术, 2015, **9**(12): 17-28.
- [6] van der Laan D C. YBa₂Cu₃O₇ - δ coated conductor cabling for low ac-loss and high-field magnet applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2009, **22**(6): 065013.
- [7] van der Laan D C, Lu X F, Goodrich L F. Compact Gd-Ba₂Cu₃O₇ - δ coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2011, **24**(4): 042001.
- [8] Van der Laan D C, Noyes P D, Miller G E, et al. Characterization of a high-temperature superconducting conductor on round core cables in magnetic fields up to 20T[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2013, **26**(4): 045005.
- [9] D C van der Laan, X F Lu, L F Goodrich. Compact Gd-Ba₂Cu₃O₇ - δ coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2011, **24**: 042001
- [10] Wang Y S, Zhang H, Fu Y, et al. Experimental research on bending characterization of 2G tapes and strand consisting of 2G tapes[J]. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2016, **26**(7): 9001705.
- [11] Li J W, Wang Y S, Zhang H, et al. Twisting characteristics and tensile effects of a quasi-isotropic strands made of coated conductors[J]. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2016, **26**(7): 4804704.
- [12] Shi C J, Wang Y S, Li J W, et al. Critical current of a quasi-isotropic HTS strand in magnetic field[J]. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2016, **26**(7): 4805105.
- [13] Takayasu M, Chiesa L, Bromberg L, et al. HTS twisted stacked-tape cable conductor[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2011, **25**(1): 014011.
- [14] Takayasu M, Chiesa L, Bromberg L, et al. Cabling method for high current conductors made of HTS tapes[J]. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2010, **21** (3): 2340-2344.
- [15] Takayasu M, Minervini J V, Bromberg L, et al. Investigation of twisted stacked-tape cable conductor[C]//AIP Conference Proceedings. *American Institute of Physics*, 2012, **1435**(1): 273-280.
- [16] Makoto Takayasu, Luisa Chiesa, and Joseph V. Minervini. Investigation of REBCO Twisted Stacked-Tape Cable Conductor Performanc[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 507: 022040.
- [17] V Zermeno, F Sirois, M Takayasu, et al. A self-consistent model for estimating the critical current of superconducting devices[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2015, **28** (8): 085004.
- [18] Zermeno VMR, et al. Open-source codes for computing the critical current of superconducting devices. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016; 26: 4901607.
- [19] Wei Chen, Haiyang Zhang, Yong Chen, et al. Numerical study on critical current and AC loss for different structured stack slotted-core HTS cables[J]. *Cryogenics*, 2019, **103** (10): 102972.
- [20] Shen B, et al. Investigation of AC loss in HTS cross-conductor cables for electrical power transmission. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019; 29: 5900205.