

EAST装置TF馈线新阈值热稳定性分析

谢杰^{1,2} 奚维斌¹ 郑金星¹ 陈子鸣^{1,2} 杜双松¹

1(中国科学院合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

摘要 EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)馈线系统连接超导磁体 and 高温超导电流引线,为磁体提供馈电通道和失超情况下能量的释放通道,是装置的一个重要部分。近年来,由于纵场(Toroidal Field, TF)馈线系统进口温度升高,出口温度有时超出阈值6.1 K,导致实验终止。为保障EAST实验的继续进行,将TF馈线的出口温度阈值提升至6.5 K。为确定新阈值下超导体运行安全,通过GANDALF软件对超导体运行时的温度裕度和稳定性能量裕度进行计算。计算结果表明:在新阈值下,导体的温度裕度大于1.5 K,稳定性裕度大于 $200 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。提升阈值后超导体依旧运行安全。

关键词 馈线, 超导体, 温度阈值, 温度裕度, 稳定性能量裕度

中图分类号 TM645

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100601

Thermal stability analysis of EAST toroidal field feeder under new threshold

XIE Jie^{1,2} XI Weibin¹ ZHENG Jinxing¹ CHEN Ziming^{1,2} DU Shuang-song¹

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

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract [Background] The experimental advanced superconducting tokamak (EAST) feeder system is an essential part of the device that connects the superconducting magnet and high-temperature superconducting current lead. It provides the magnet with feeding and energy release channels in the event of quenching. In recent years, owing to the increase in the inlet temperature of the toroidal field (TF) feeder system, the outlet temperature has occasionally exceeded the threshold of 6.1 K, resulting in the termination of the experiment. [Purpose] This study aims to ensure the continuation of the EAST experiment by thermal stability analysis under new TF feeder outlet temperature threshold of 6.5 K. [Methods] Based on the system structure and low-temperature operation data of the TF feeder and superconducting conductor, a mathematical model for temperature margin and current shunt temperature of superconducting conductor was established. Then, the mathematical model and GANDALF software were employed to calculate the temperature and stability margins of superconducting conductors during operation under different background magnetic fields and operating currents. [Results] The calculations results indicate that under the new threshold of 6.5 K, the temperature margin of the conductor is greater than 1.5 K and that the stability energy margin is greater than $200 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$. [Conclusions] The superconducting conductor remains safe for use after increasing the threshold.

Key words Feeder, Superconducting conductor, Temperature threshold, Temperature margin, Stability energy margin

中国科学院大科学装置项目(No.075ETY9301)资助

第一作者: 谢杰, 男, 1999年出生, 2020年毕业于中国矿业大学, 现为硕士研究生, 研究领域: 超导电工技术

通信作者: 奚维斌, E-mail: xiwb@ipp.ac.cn

收稿日期: 2022-11-08, 修回日期: 2023-04-07

Supported by the Large Scientific Installation Project of Chinese Academy of Sciences (No.075ETY9301)

First author: XIE Jie, male, born in 1999, graduated from China University of Mining and Technology in 2020, master student, focusing on superconducting electric technology

Corresponding author: XI Weibin, E-mail: xiwb@ipp.ac.cn

Received date: 2022-11-08, revised date: 2023-04-07

EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 是中国自主设计、建造, 并成功投入实验运行的世界首台全超导托卡马克^[1]。馈线系统是 EAST 中的一个重要系统, 负责给超导磁体提供馈电通道和失超情况下能量的释放通道。纵场 (Toroidal Field, TF) 馈线系统经改造后一直运行良好, 近些年来, 由于进口温度由原先的 5 K 提升到了 5.2 K, 导致出口温度有时超出现有阈值 6.1 K, 切断实验进程。为保证实验的继续进行, 在不升级改造低温系统的前提下, 将 TF 馈线的出口温度阈值调至 6.5 K。提升阈值虽然会使出口温度不再超阈值, 但会对馈线系统超导导体的运行稳定和安全产生影响。超导导体的可靠性和安全性会影响超导磁体的安全, 因此需要进行慎重考虑。为研究阈值提升后运行是否安全, 通过 GANDALF 软件对阈值提升后超导导体的温度裕度和稳定性裕度进行计算, 并与设计时的温度裕度和稳定性裕度比较, 判断新阈值下超导体运行是否安全。

1 TF 馈线系统

1.1 馈线系统结构

2014 年, 为了在外杜瓦 I 窗口加入离子回旋辅助加热装置^[2], 将两个电流引线罐搬至距 EAST 主机大厅 30 m 左右的新电源系统附近, 为此对 EAST 磁体馈线系统进行了改造。改造后的示意图如图 1 所示。改造后的 TF 馈线系统采用两段式设计, 通过超导接头将原有的超导母线和新加的超导母线连接起来, 并在连接接头处增加真空隔断, 将主机真空和新超导母线的真空分隔开。改造过程中, 新的超导母线的冷屏采用国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 的馈线

设计方式; 母线支撑结构及间距沿用原有设计; 真空隔断采用 ITER 馈线设计; 超导接头使用 ITER 超导接头技术设计。

改造时对 TF 馈线系统做了一定要求。为确保冷却导体的氦始终处于超临界态, 要求馈线系统出口压力大于 2.5×10^5 Pa; 为确保导体有一定的温度裕度和稳定性裕度, 要求馈线出口温度小于 6.1 K。

1.2 TF 馈线低温参数

2015~2022 年, TF 馈线的几组运行数据见表 1。

表 1 TF 馈线历年低温运行数据
Table 1 TF feeder low-temperature operation data over the years

时间 Time	进口温度 Inlet temperature / K	进口压力 Inlet pressure / Pa	进口流量 Inlet flowrate / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	出口温度 Outlet temperature / K
2015/06/04	5.09	3.71×10^5	4.36	5.93
2016/01/26	4.98	3.78×10^5	4.72	5.86
2017/07/07	5.11	3.83×10^5	4.71	5.99
2018/06/04	5.05	3.76×10^5	4.81	5.84
2019/04/06	5.13	3.67×10^5	4.62	5.84
2020/05/12	5.22	3.84×10^5	4.68	5.97
2021/05/10	5.17	3.84×10^5	4.78	6.04
2022/05/07	5.23	3.75×10^5	4.74	6.06

可以看出, 进口压力和流量基本维持稳定, 进口温度和出口温度在慢慢升高。改造后的几年进口温度在 5 K 左右, 近几年来进口温度已达到 5.2 K, 所以近几年的出口温度已接近 6.1 K, 有时会超过 6.1 K, 导致实验被迫切断, 为了实验的继续进行, 2022 年将出口温度阈值提升至 6.5 K。

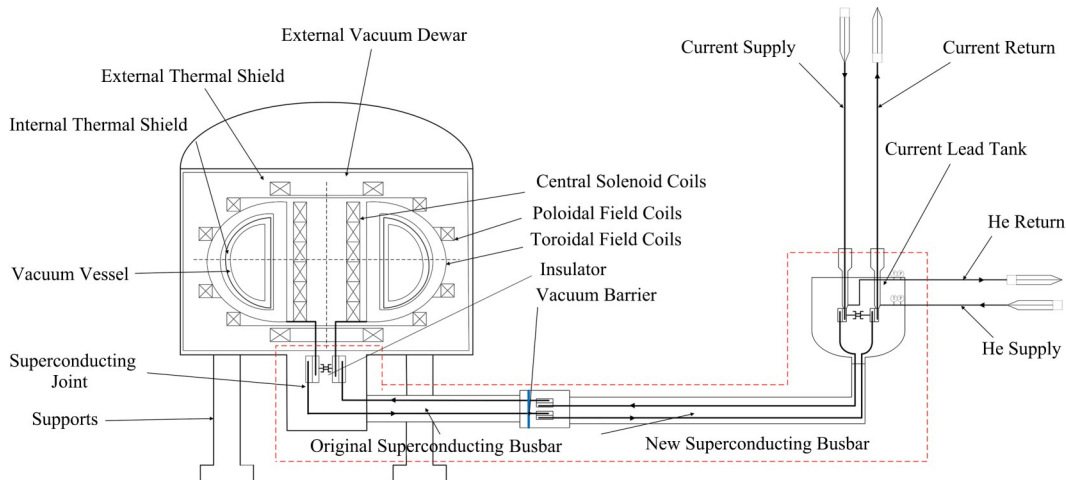


图 1 EAST 装置示意图
Fig.1 Schematic of EAST device

1.3 超导体

提升出口温度阈值虽然可以解决出口温度超阈值的问题,但会降低超导导体的温度裕度和稳定性能量裕度,影响超导导体的运行安全。TF馈线中的超导母线采用管内电缆导体(Cable-In-Conduit Conductors, CICC),改造后的TF馈线系统是在原有的21 m CICC基础上,再加上51 m的新CICC。原有CICC采用(2SC+2Cu)×3×4×5+1CCC(Copper Cable Core)的结构,共120根超导体线和141根铜股线^[3];新CICC采用3×4×5×5的超导缆结构,共300根超导体线,没有铜股线,新CICC导体稳定性更好。

两种CICC的结构和参数见图2^[4]和表2^[5]。

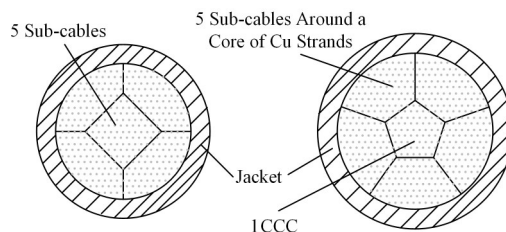


图2 CICC导体示意图(左为新CICC,右为原有CICC)
Fig.2 Schematic of the CICC conductor (new CICC on the left, and original CICC on the right)

表2 CICC的结构参数
Table 2 Structural parameters of CICC

参数 Parameter	原有CICC Original CICC	新CICC New CICC
超导材料 Superconducting materials	NbTi	NbTi
铜超比 Copper-to-superconductor ratio	1.38	2.3
超导体线直径 Diameter of superconducting strand / mm	0.87	0.73
铜股线直径 Diameter of Cu strand / mm	0.98	0
铠甲直径 Diameter of Jacket / mm	23	21
电缆截面积 Cross section of cable / mm ²	284.08	208.00
股线截面积 The cross-sectional area of strands / mm ²	177.69	125.56
超导体截面积 Superconductor cross-sectional area / mm ²	29.70	37.63
空隙截面积 Helium in cable space / mm ²	101.93	78.25
空隙率 Void fraction	35.88	37.62

2 新阈值下的温度裕度

2.1 数学模型

温度裕度 T_m 和分流温度 T_{cs} 是描述超导体温度稳定性的两个重要指标。当导体上出现扰动后,导体温度由运行温度 T_{op} 开始上升,升至分流温度 T_{cs} 后,超导体中电流开始分流,一部分电流流入铜基体中并开始产生焦耳热^[6]。温度裕度 T_m 是分流温度 T_{cs} 和运行温度 T_{op} 的差值,表征了超导体失超前其周围的氦能吸收热量的能力^[7],温度裕度越大,超导导体的稳定性就越好。超导导体的温度裕度可由式(1)计算:

$$T_m = T_{cs} - T_{op} = (T_c - T_{op}) \left(1 - \frac{I_{op}}{J_c} \right) \quad (1)$$

式中: I_{op} 是超导导体的运行电流; T_c 是超导导体的临界温度; J_c 是超导导体的临界电流; T_c 和 J_c 可由下面公式进行计算^[8]。

$$T_c = T_{c0} \left(1 - \frac{B}{B_{c20}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$J_c = \frac{C_0}{B} b^\alpha (1-b)^\beta (1-t^n)^\gamma \quad (3)$$

$$B_{c2} = B_{c20} (1 - t^n) \quad (4)$$

$$b = \frac{B}{B_{c2}(T)} \quad (5)$$

$$t = \frac{T_{op}}{T_{c0}} \quad (6)$$

式中: T_{c0} 是超导体在零场时的临界温度, K; B_{c20} 是超导体在零场时的上临界磁场, T; C_0 是超导体临界电流密度的归一化常数, $AT \cdot mm^{-2}$; B 是背景磁场, T; n 是与导体相关的变量, NbTi 导体一般取 1.7; α, β, γ 是指数变量。TF 馈线导体的相关定标参数如表 3 所示。

表3 馈线导体的定标参数
Table 3 Calibration parameters of feeder conductor

参数 Parameter	T_{c0} / K	B_{c20} / T	C_0 / $AT \cdot mm^{-2}$	α	β	γ
数值 Value	8.79	13.72	113 200	0.98	0.98	1.96

图 3 是 EAST 装置周围的磁场分布。由图 3 可知,馈线所处的背景磁场始终小于 1 T,大部分 TF 馈线所处的背景磁场小于 0.1 T;最大背景磁场在馈线与磁体的交接处,背景磁场在 0.5~1 T。馈线系统设计时取的背景磁场为 0.5 T^[9],在最大运行电流下

14.5 kA 下, 馈线导体自产生的磁场在 0.01 T 左右, 导体的背景磁场小于 1 T。下面的计算分别取 0.5 T 和 1 T 作为背景磁场, 通过计算背景磁场最大时导体的裕度来判断导体的稳定性。

2.2 导体的温度裕度

为判断新阈值下导体的温度裕度是否满足运行安全的要求。当前冷却温度下, EAST 纵场磁体的最大设计电流为 14.5 kA。目前纵场最大运行电流为 12 kA, 还未达到最大设计电流。通过计算 14.5 kA 时的裕度来确定导体是否满足运行要求。图 4 中是运行温度 6.5 K 时, 不同背景磁场及运行电流下的温度裕度和电流分流温度。由图 4(a) 可知, 在 0.5 T 背景磁场下, 新旧导体在 14.5 kA 下的温度裕度分别为 1.85 K、1.8 K; 在 1 T 的背景磁场下, 新旧导体在 14.5 kA 下的温度裕度分别为 1.65 K、1.6 K。温度裕度始终大于 1.5 K, 满足 ITER 中 NbTi 导体温度裕度大于 1.5 K 的要求^[10]。由图 4(b) 可知, 新旧导体在不同背景磁场和运行电流下的分流

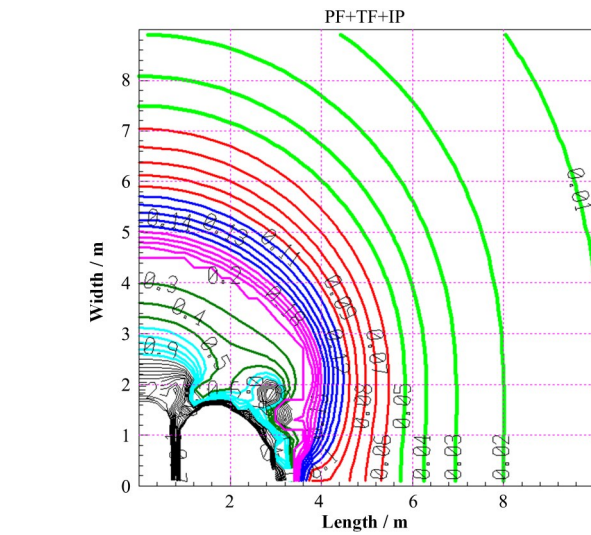
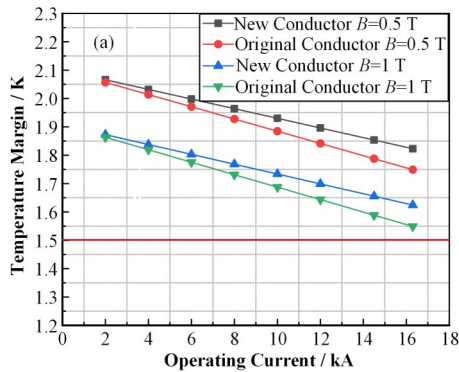


图3 EAST装置周围磁场分布(零点是EAST主机)
Fig.3 Magnetic field distribution around EAST (zero point is EAST)

温度均大于 8 K, 远大于出口阈值 6.5 K。因此, 新阈值下导体的温度裕度满足运行安全要求。

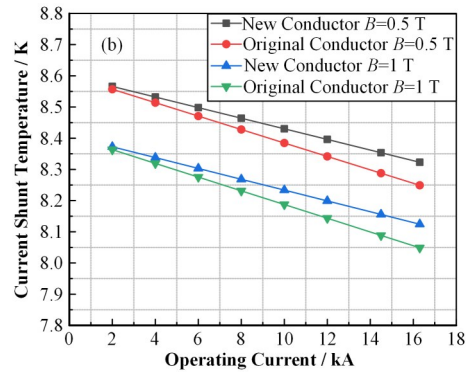


图4 不同背景磁场及运行电流下的温度裕度和电流分流温度 (a) 温度裕度, (b) 电流分流温度
Fig.4 Temperature margin and current shunt temperature of conductor under different background magnetic fields and operating currents

(a) Temperature margin, (b) Current shunt temperature

3 新阈值下的稳定性能量裕度

3.1 稳定性能量裕度

在磁体运行中, 导体会受到等离子体放电、机械振动、交流损耗等多种扰动^[11]。当超导导体受到一定能量扰动时, 如果这个能量恰好能引起超导导体失超且无法恢复, 这个扰动能量被称为导体的最小失超能 (Minimum Quench Energy, MQE), 即稳定性能量裕度^[12]。超导导体的稳定性能量裕度可由式 (7) 计算:

$$Q_{MQE} = \frac{Q_0 \Delta L \Delta t}{(A_{sc} + A_{cu}) \Delta L \times 1000} \quad (7)$$

式中: Q_{MQE} 是超导导体的稳定性能量裕度, $\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$;

Q_0 是超导导体上的最大能量扰动, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$; ΔL 是扰动长度, m ; Δt 是扰动时间, s ; A_{sc} 和 A_{cu} 为超导丝和铜丝的截面积, m^2 。

GANDALF 软件是瑞士欧洲核子研究组织 (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN) 的 Luca Bouttra 博士开发的用于 CICC 稳定性计算的软件^[13]。GANDALF 采用一维热工水力分析方法, 模拟给定结构 CICC 导体在不同能量扰动下的稳定性。通过 GANDALF, 在导体中间加入能量扰动, 通过判断导体最后能否恢复正常, 可以确定给定扰动条件下的最大能量扰动, 进而确定 CICC 导体在该扰动下的稳定性能量裕度。

3.2 导体的稳定性能量裕度

在运行中,馈线导体会受到不同扰动时间和扰动长度的电磁扰动和机械扰动。为分析新阈值下馈线导体的稳定性裕度是否满足需求,通过GANDALF软件模拟了随扰动时间变化的慢扰动(如导管内部压强升高、交流损耗等造成的)和随扰动长度变化的快扰动(如环氧断裂、绕组移动等造成的)。

图5是扰动长度1 m、扰动时间0.01 s时,稳定性能量裕度随电流的变化。可以看出,稳定性能量裕度随电流的升高而降低,因此,馈线最大运行电流14.5 kA时的能量扰动最大,稳定性能量裕度最小。

图6是电流为14.5 kA时,不同扰动下的稳定性能量裕度。图6(a)是扰动长度为1 m时,扰动时间从0.01 s增加到0.1 s时稳定性能量裕度的变化。可以看出,稳定性能量裕度随扰动时间增加而减小,但稳定性裕度降低的幅度并不大,且始终大于 $800 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。图6(b)是扰动时间为0.01 s、扰动长度从1 m增加到5 m时稳定性能量裕度的变化。从图中可看出,稳定性能量裕度随扰动长度增加而减小,裕度降低幅度较大。扰动长度从1 m增加到5 m

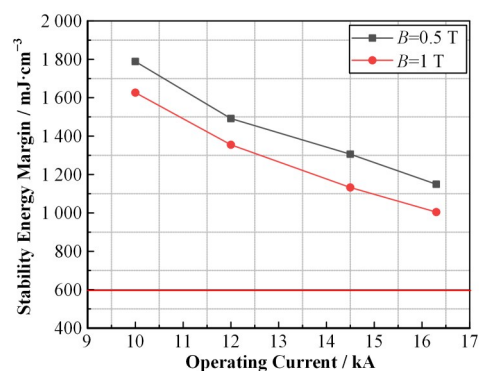


图5 不同运行电流下的稳定性能量裕度 (扰动长度1 m, 扰动时间0.01 s)

Fig.5 Stability energy margin of feeder conductor under different operating currents (disturbance length 1 m, and disturbance time 0.01 s)

后,稳定性能量裕度降低一半,但始终大于 $600 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

TF馈线设计时取 $200 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的稳定性能量裕度。新阈值下慢扰动和快扰动的稳定性能量裕度均大于 $600 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$,均大于设计时的 $200 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的裕度要求,因此,可认为新阈值下导体的稳定性裕度满足安全要求。

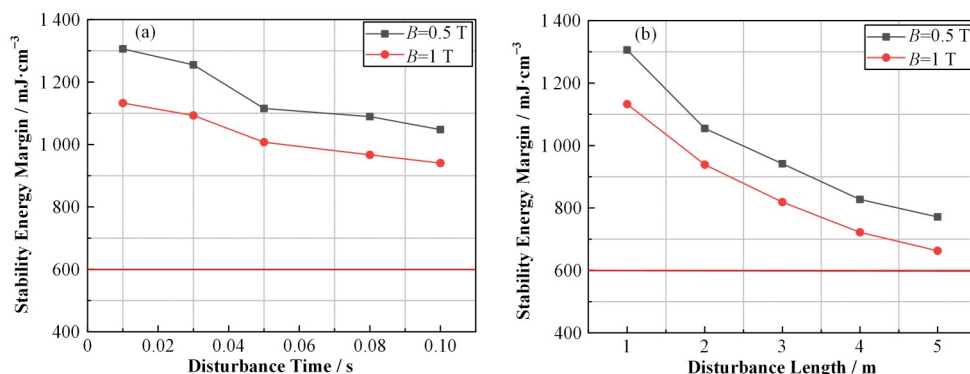


图6 不同扰动时间和扰动长度下的稳定性能量裕度(运行电流14.5 kA)
(a) 稳定性能量裕度随扰动时间的变化,(b) 稳定性能量裕度随扰动长度的变化

Fig.6 Stability energy margin of feeder conductor under different disturbance times and disturbance lengths (for 14.5 kA operating current) (a) Variation of stability energy margin with disturbance time, (b) Variation of stability margin with disturbance length

4 结语

为确定新阈值下导体的稳定性,本文通过数学模型和GANDALF软件对新阈值下TF馈线导体进行稳定性分析。计算表明:在6.5 K的阈值下运行,导体的温度裕度为1.8 K,稳定性能量裕度大于 $600 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$,满足馈线导体的稳定性要求(温度裕度大于1.5 K,稳定性能量裕度大于 $200 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-3}$)。因此,在TF馈线系统的新阈值下,导体可以安全稳定运行,TF馈线系统在新阈值能稳定安全运行。

作者贡献声明 谢杰负责酝酿和设计实验,实施研

究,采集数据,分析数据,起草文章;奚维斌负责文章的整体构思和修改;郑金星负责行政、技术材料支持,对文章的知识性内容做出指导;陈子鸣负责统计分析;杜双松负责对文章的知识性内容作批评性审阅。

参考文献

- 1 万宝年,徐国盛.EAST全超导托卡马克高约束稳态运行实验研究进展[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(4):47-59.

WAN Baonian, XU Guosheng. Advances in experimental

- research towards high confinement and steady state operation on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, **49**(4): 47 - 59.
- 2 Song Y T, Li J G, Wan Y X, *et al.* The accomplishments and next-step plan of EAST in support of fusion[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, **42**(3): 415 - 420. DOI: [10.1109/TPS.2014.2301159](https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2301159).
- 3 毕延芳. EAST超导托克马克磁体的大型供电供冷外馈线[J]. *低温物理学报*, 2009, **31**(4): 333 - 337. BI Yanfang. Large-scale outer feeders for sc magnets of east tokamak[J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 2009, **31**(4): 333 - 337.
- 4 Xi W B, Deng W, Zhu H S, *et al.* Design of the new SC bus-line system for the EAST [J]. *Journal of Fusion Energy*, 2014, **33**(6): 658 - 664. DOI: [10.1007/s10894-014-9727-0](https://doi.org/10.1007/s10894-014-9727-0).
- 5 邓威, 奚维斌, 张之荣. EAST装置新超导馈线系统冷却回路设计[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2015, **35**(1): 41 - 46. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2015.01.008](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2015.01.008). DENG Wei, XI Weibin, ZHANG Zhirong. Design of cooling loops of new SC bus-lines for EAST device[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2015, **35**(1): 41 - 46. DOI: [10.16568/j.0254-6086.2015.01.008](https://doi.org/10.16568/j.0254-6086.2015.01.008).
- 6 何欣, 郑金星, 宋云涛, 等. CFETR极向场磁体CICC导体稳定性与交流损耗分析[J]. *电工技术学报*, 2016, **31**(19): 224 - 231. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.19.024](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.19.024). HE Xin, ZHENG Jinxing, SONG Yuntao, *et al.* Stability and AC loss analysis of the CICC for CFETR poloidal field coils[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, **31**(19): 224 - 231. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.19.024](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.19.024).
- 7 Li S L, Wu Y, Liu B, *et al.* Current sharing temperature test and simulation with GANDALF code for ITER PF₂ conductor sample[J]. *Plasma Science and Technology*, 2011, **13**(5): 627 - 630.
- 8 Bottura L. A practical fit for the critical surface of NbTi [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2000, **10**(1): 1054 - 1057. DOI: [10.1109/77.828413](https://doi.org/10.1109/77.828413).
- 9 邓威, 奚维斌, 朱海生. EAST新超导母线稳定性分析[J]. *低温与超导*, 2015, **43**(3): 37 - 41. DOI: [10.16711/j.1001-7100.2015.03.008](https://doi.org/10.16711/j.1001-7100.2015.03.008). DENG Wei, XI Weibin, ZHU Haisheng. Stability analysis of the new superconducting bus-lines in EAST[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2015, **43**(3): 37 - 41. DOI: [10.16711/j.1001-7100.2015.03.008](https://doi.org/10.16711/j.1001-7100.2015.03.008).
- 10 Ilyin Y, Bessette D, Zapretilina E, *et al.* Performance analysis of the ITER poloidal field coil conductors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, **20**(3): 415 - 418. DOI: [10.1109/TASC.2010.2041216](https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2041216).
- 11 Bruzzone P, Fuchs A, Stepanov B, *et al.* Transient stability results for Nb₃Sn cable-in-conduit conductors[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2002, **12**(1): 512 - 515. DOI: [10.1109/TASC.2002.1018455](https://doi.org/10.1109/TASC.2002.1018455).
- 12 张正硕, 郑金星, 宋云涛, 等. 中国聚变工程实验堆纵场超导磁体高性能Nb₃Sn CICC导体稳定性分析[J]. *电工技术学报*, 2020, **35**(24): 5031 - 5040. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191369](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191369). ZHANG Zhengshuo, ZHENG Jinxing, SONG Yuntao, *et al.* Stability analysis of high-performance Nb₃Sn CICC conductor in China fusion engineering testing reactor toroidal field superconducting magnets[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, **35**(24): 5031 - 5040. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191369](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191369).
- 13 Bottura L. A numerical model for the simulation of quench in the ITER magnets[J]. *Journal of Computational Physics*, 1996, **125**(1): 26 - 41. DOI: [10.1006/jcph.1996.0077](https://doi.org/10.1006/jcph.1996.0077).