

ITER 高功率磁场抗扰度测试系统研究

许雪松^{1,2}, 黄亚^{1,✉}, 雷红¹, 蒋力¹, 张杰^{1,2}, 王琨³

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031; 2. 合肥科聚高技术有限公司, 安徽合肥 230031; 3. 中国能源集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽合肥 230601)

摘要: [目的] 为了保证设备的安全稳定运行, 受国际热核实验堆 (ITER) 组织监管的电力电子设备必须通过相关的磁场抗扰度测试。[方法] 以 ITER 要求为基准, 定义了所需测试系统的参数要求, 选择方形螺线管线圈和方形三线圈作为研究对象, 通过数值计算方法计算出最优性能的结构参数, 并使用有限元的方法验证计算的正确性。[结果] 对比两种线圈型式, 选择功耗较小的螺线管作为最终的结构。然后以此参数为基准, 分析了直流暂态的功率拓扑, 计算了相关参数, 确定了最终电源所需要的性能数据。[结论] 研究为 ITER 高功率磁场抗扰度测试系统的感应线圈及其电源的设计提供了详细的计算过程和设计参考。

关键词: 抗扰度测试; 感应线圈; 螺线管; 磁场测量; 有限元法; 磁场均匀性

中图分类号: TL4; TM15

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)02-0026-07

开放科学 (资源服务) 二维码:



Research on the High Power Magnetic Field Immunity Test System for ITER

XU Xuesong^{1,2}, HUANG Ya^{1,✉}, LEI Hong¹, JIANG Li¹, ZHANG Jie^{1,2}, WANG Kun³

(1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China; 2. Hefei KeJuGao Technology Co., Ltd., Hefei 230031, Anhui, China; 3. China Energy Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: [Introduction] To ensure the safe and stable operation of the equipment, the power electronic equipment regulated by the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) organization must pass the relevant magnetic field immunity test. [Method] Based on ITER requirements, the parameter requirements of the required test system were defined. Square solenoid coil and square three coil were selected as the research objects. The structural parameters of the optimal performance were calculated by numerical calculation method, and the correctness of the calculation was verified by finite element method. [Result] Compared with the two coil types, the solenoid with low power consumption is selected as the final structure. Then, based on this parameter, the power topology of DC transient is analyzed, the relevant parameters are calculated, and the performance data required by the final power supply is determined. [Conclusion] The research of this paper provides a detailed calculation process and design reference for the design of induction coil and its power supply of ITER high-power magnetic field immunity test system.

Key words: immunity test; induction coil; solenoid; magnetic field measurement; finite element method; magnetic field uniformity

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着磁约束聚变的发展, 托卡马克装置的参数

越来越高, 周围环境中会产生非常强的空间磁场; 同时, 等离子体破裂过程时电流迅速衰减, 形成很大的瞬态磁场。如图 1 所示, ITER 装置周围的最大稳态

磁场超过 200 mT 最大磁场变化率也超过 7 T/s^[1], 这种高强度的空间杂散磁场会影响主厅内与聚变装置相关部件和系统的稳定运行。

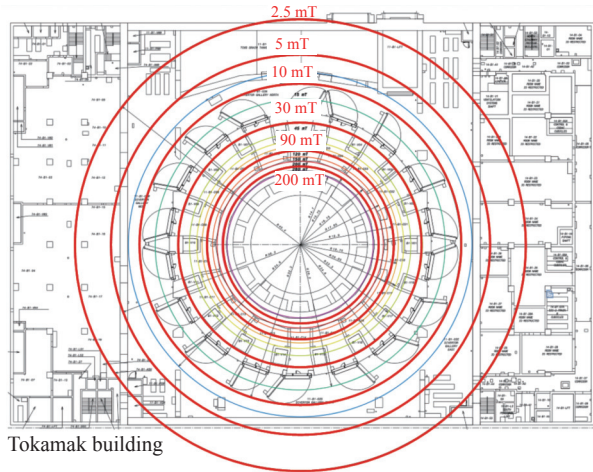


图 1 ITER 托卡马克装置周围的最大稳态磁场分布
Fig. 1 Maximum steady-state magnetic field distribution around ITER Tokamak

强磁场引起的电磁干扰是托卡马克装置及其电源系统的一个独特问题。开展电磁干扰研究, 解决干扰问题, 对保证托卡马克装置的正常运行和物理实验的发展具有重要意义。ITER 组织计划建设一个高功率磁场抗扰度测试系统以验证被测部件能够在对应环境下可靠工作, 如图 2 所示。同时, 随着聚变装置所用的变流器容量增大和非同相逆并联结构的应用, 强磁场电磁干扰问题在工业中日益突出。因此, 该平台的成功构建也可以为业界的 EMC 测试提供必要的手段。

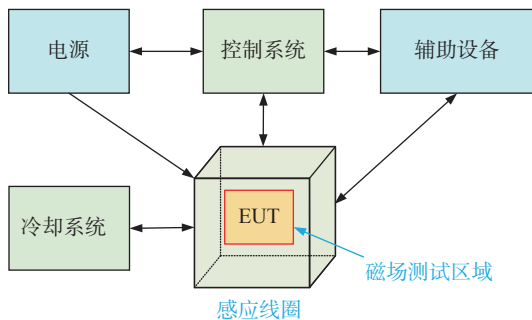


图 2 高功率磁场抗扰度测试系统框图
Fig. 2 Diagram of the high power magnetic field immunity test system

磁场抗扰度测试需要在 X、Y 和 Z 三个正交方向上进行, 因此磁场均匀区域最好是一个立方体。而在 ITER 组织规定中, 产生均匀磁场的尺寸为 2.1 m×

2.1 m×2.1 m^[1]。为了计算方便, 引入以下参数:

- 1) 最小磁场(B_{\min}): 均匀区域内磁感应强度的最小值。
- 2) 最大磁场(B_{\max}): 均匀区域内磁感应强度的最大值。
- 3) 磁场均匀度(η): 最大和最小磁场的比值。

$$\eta = \frac{B_{\max}}{B_{\min}} \quad (1)$$

高功率磁场抗扰度测试系统核心部件是能产生均匀磁场的感应线圈, 目前主要包括螺线管线圈、亥姆霍兹线圈、多线圈组和三维正交线圈等结构。螺线管线圈是一种常见的结构, 世界各地的科学家已经对这些线圈的结构、原理、测试和应用进行了研究^[2-4]。亥姆霍兹线圈结构简单, 是研究最多的形式, 相关科研工作者做了设计^[5], 对其磁场均匀性进行了研究^[6-7], 对于其结构、原理和优化有着详细的分析^[8-9]。而对于需要更高磁场均匀性的场合, 可以使用多线圈组结构, 科学家们研究了不同线圈组的磁场均匀性, 包括三线圈系统的研制^[10-12], 四线圈系统的设计^[13], 三维球形线圈^[14] 研究, 并进行更多的改进优化方案^[15-17]。正交线圈结构也有相应的阐述^[18-19]。由于方形结构在大型设备的制造和焊接过程中比圆形具有更多优势^[20-21], 因此 ITER 组织^[1] 和 IEC(国际电工委员会) 在磁场抗扰度试验中推荐了方形结构。

1 测试内容及实施方案

对于 ITER 的空间磁场形态主要包括稳态磁场即瞬态变化磁场, 需要进行稳态和瞬态磁场测试。

1.1 稳态磁场试验

稳态磁场测试用于托卡马克装置周围强磁环境中敏感设备和部件的 EMC 测试, 也可用于变流器周围敏感设备和部件的测试。其核心是直流磁场感应线圈和直流电源系统。

直流磁场感应线圈主要用于在特定的区域内产生一定强度的均匀磁场。本测试标准参照 ITER 组织设计, 其磁场均匀性不大于 1.4。由于 ITER 托卡马克装置周围的磁场高达 0.2 T, 考虑到未来托卡马克装置的更高参数需求, 试验线圈的实际最大试验容量选择为 0.5 T。

根据试验的具体要求, 需要设计两套试验线圈。第一组 2.1 m/0.5 T 线圈可在 2.1 m×2.1 m×2.1 m 的

立方体空间内产生至少 0.5 T 的均匀稳态磁场, 磁场均匀性设计指标取 1.3。主要用于大型设备和部件的电磁兼容测试。第二组 1 m/0.5 T 线圈可在 1 m×1 m×1 m 的立方体空间内产生至少 0.5 T 的均匀稳态磁场, 磁场均匀性设计指标取 1.1。除了对小型设备和部件进行电磁兼容测试外, 还可以用于某些设备和部件的故障等级测试和故障机理研究。

1.2 瞬态磁场试验

瞬变磁场测试主要用于托卡马克装置相关敏感设备在等离子体破裂条件下, 在强瞬变磁场作用下的电磁兼容性测试。电路如图 3 所示。R 和 L 是电感和电阻, R_0 是能量放电电阻。首先, 线圈由电源充电, 然后进行放电, 会形成较高的 di/dt , 产生符合要求的磁场变化率。在 ITER 托卡马克装置最严重的 17 MA/41 ms 主破裂期间产生的瞬变磁场为 7 T/s, 持续时间为 41 ms。同样, 考虑到装置未来可能更严重的破裂, 试验中的磁场变化率选 14~30 T/s, 并维持 50 ms。

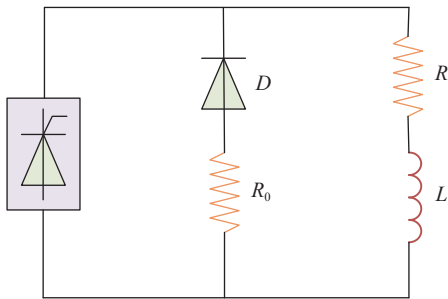


图 3 直流瞬态磁场测试电路拓扑

Fig. 3 Circuit topology of DC transient magnetic field test

2 线圈系统的设计

2.1 方形螺线管线圈的分析

方形螺线管线圈如图 4 所示, 线圈平均边长 a 和线圈轴向高度 h 以及安匝数为 NI 。基于理想模型, 通过磁场数值计算得到了 2.1 m/0.5 T 和 1 m/0.5 T 条件下磁场均匀度 η 和总线圈损耗 P 相对于线圈尺寸 (a 和 h) 的分布, 如图 5 所示。导体电流密度取为 $J=4 \text{ A/mm}^2$ 。

通过图 5 提取线圈参数, 如表 1 所示。

图 6 所示为有限元仿真模型, 计算磁场情况, 如图 7 所示。对于 2.1 m/0.5 T 结构, 最小磁场为 500.0 mT, 最大值为 648.2 mT, 磁场均匀性为 1.296。对于 1 m/0.5 T 结构, 最小磁场 500.0 mT, 最大磁场为 550.9 mT, 磁场均匀性为 1.102。

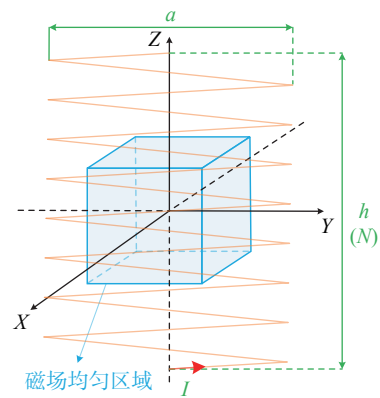
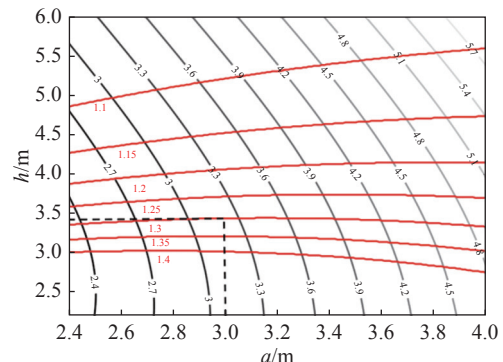
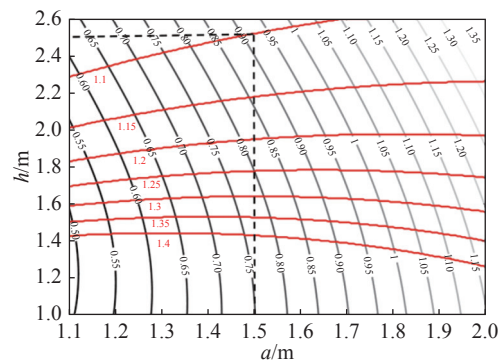


图 4 螺线管线圈结构

Fig. 4 Solenoid configuration



(a) 2.1 m/0.5 T



(b) 1 m/0.5 T

图 5 磁场均匀性、功率损耗与结构参数的关系

Fig. 5 Relationship between magnetic field uniformity, power loss and structural parameters

2.2 方形三线圈的分析

三线圈结构如图 8 所示。有三组线圈 (C_1 、 C_0 、 C_{-1}): 边长为 a_3 , 两个侧边线圈之间的距离为 h_3 , 两侧的安匝数为 $N_{31}I$, 中间线圈的安匝数为 $N_{30}I$ 。侧线圈与中间线圈的匝数比定义为 β_3 , 可描述为

$$\begin{cases} \beta_3 = N_{31}/N_{30} \\ M_3 = N_{30}I + 2N_{31}I \end{cases} \quad (2)$$

式中:

表 1 方形螺线管线圈的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of square solenoid coil

| 类型 | 2.1 m/0.5 T | 1 m/0.5 T |
|----------------------|-------------|-------------|
| 导体截面/mm ² | 200×60 | 200×60 |
| 匝数 | 50 | 36 |
| 绝缘间距/mm | 10 | 10 |
| 横向尺寸 | 2.8 m/3.2 m | 1.3 m/1.7 m |
| 纵向尺寸/m | 3.49 | 2.51 |
| 总重量/t | 19.5 | 7.0 |
| 电流/kA | 45.0 | 35.6 |
| 电感/mH | 5.27 | 0.983 |
| 电阻/mΩ | 1.470 | 0.514 |
| 功耗/MW | 2.981 | 0.651 |

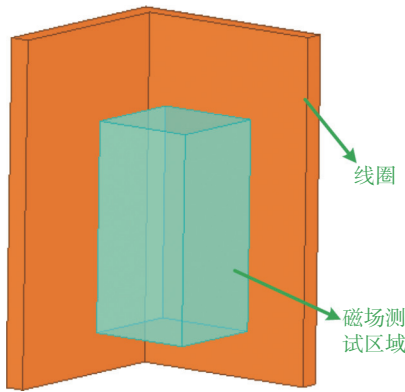


图 6 方形螺线管线圈的 1/4 模型

Fig. 6 1/4 model of the solenoid coil

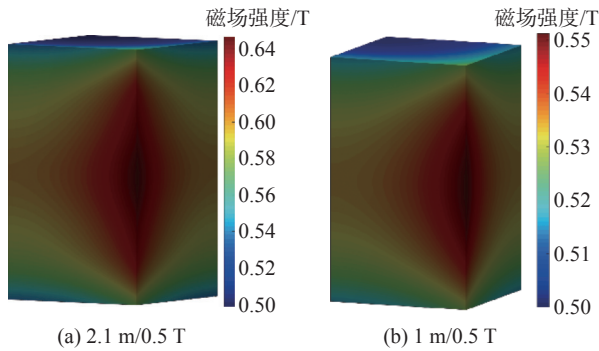


图 7 测试区域内线圈的磁场分布(1/4)

Fig. 7 Magnetic field distribution (1/4) of the solenoid coil in the test area

M_3 ——线圈的总安匝数。

最佳磁场均匀性参数之间的关系为^[30]

$$\begin{cases} \frac{a_3}{s} = 1.392 + 176.2e^{-5.601\eta} \\ \beta_3 = 1.029 + 27.82e^{-3.532\eta} \\ \frac{h_3}{s} = 0.9442 \cdot \frac{a_3}{s} - 0.2384 \end{cases} \quad (3)$$

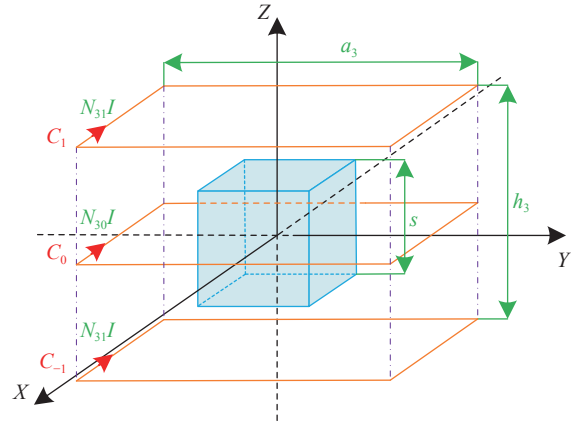


图 8 三线圈结构

Fig. 8 Three-coil configuration

2.1 m/0.5 T 和 1 m/0.5 T 下的参数按表 2 所示的公式计算, 电流不得太大 ($I \leq 100$ kA)。由于匝数必须为整数, 绘制磁场均匀性误差和 2.1 m/0.5 T 匝数的分布曲线, 如图 9 所示。

表 2 三线圈的参数

Tab. 2 Parameters of three-coil

| 参数 | 2.1 m/0.5 T | 1 m/0.5 T |
|------------------|-------------|--------------|
| a_3 /m | 3.178 | 1.764 m |
| h_3 /m | 2.500 | 1.427 m |
| β_3 | 1.311 | 1.601 |
| M_3 /MA | 2.300 | 1.267 MA |
| $N_{30}+2N_{31}$ | ≥ 23 | ≥ 12.67 |

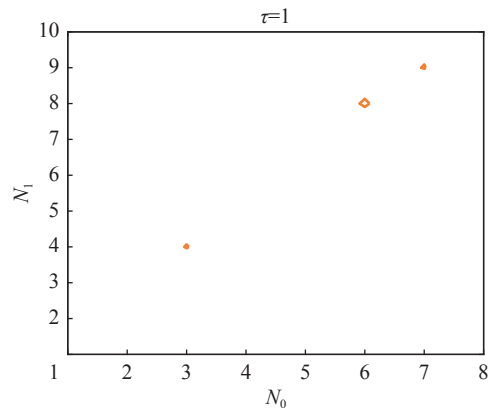


图 9 磁场均匀度误差分布

Fig. 9 Distribution of magnetic field uniformity error

$$\sigma = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \times 100\% \quad (4)$$

在误差为 1 的前提下, 通过相同的方法获得了 2.1 m/0.5 m/0.5 T 的最小整数圈数 $N_0=7$ 、 $N_1=9$ 和 $I=92.0$ kA, $N_0=3$ 、 $N_1=5$ 和 $I=97.5$ kA。

根据上述线圈结构参数和线圈产生磁场的的能力,可以估算不同最小试验磁场下的总线圈重量和总线圈功率损耗。总重量 G_3 和总功率损失 P_3 可表示为

$$\begin{cases} G_3 = \rho V_3 = \frac{\rho}{J} \cdot 4a_3 \cdot M_3 = \frac{\rho}{J} \cdot 4a_3 \cdot (N_0 + 2N_1)I \\ P_3 = \frac{J^2 V_3}{\sigma} = \frac{J}{\sigma} \cdot 4a_3 \cdot M_3 = \frac{J}{\sigma} \cdot 4a_3 \cdot (N_0 + 2N_1)I \end{cases} \quad (5)$$

式中:

ρ —— 导体质量密度(kg/m^3);

J —— 导体电流密度, $J=4 \text{ A}/\text{mm}^2$;

σ —— 导体电导率(S/m);

V_3 —— 总体积(m^3)。

采用既有 $400 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 铝母线,层间绝缘 10 mm 。

通过计算得到线圈参数,如表3所示。

表3 方形三线圈的基本参数

Tab. 3 Basic parameters of square three-coil

| 类型 | 2.1 m/0.5 T | 1 m/0.5 T |
|----------------------|-----------------|-----------------|
| 导体截面/ mm^2 | 400×60 | 400×60 |
| 匝数 | 9/7/9 | 5/3/5 |
| 绝缘距离/ mm | 10 | 10 |
| 横向尺寸 | 2.778 m/3.578 m | 1.364 m/2.164 m |
| 纵向尺寸/ m | 3.120 | 2.047 |
| 总重量/ t | 19.7 | 6.1 t |
| 电流/ kA | 92.0 | 97.5 |
| 电感/ mH | 5.27 | 0.983 |
| 电阻/ $\text{m}\Omega$ | 0.419 | 0.128 |
| 功耗/ MW | 3.544 | 1.084 |

基于上述参数,建立图10所示的仿真模型,以计算磁场分布,如图11所示。对于 $2.1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$,最小磁场为 500.0 mT ,最大值为 651.7 mT ,磁场均匀性为 1.303 。对于 $1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$,最小磁场为 500.0 mT ,最大磁场为 553.4 mT ,磁场均匀性为 1.107 。方形螺线管线圈功耗 2.981 MW ($2.1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$) 和 0.651 MW ($1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$),对比三线圈结构 3.544 MW ($2.1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$) 和 1.084 MW ($1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$) 在功耗方面更占优势。选择方形螺线管作为最终结构。

3 电源参数计算

3.1 直流稳态磁场测试电源

在直流稳态磁场试验中,要求直流电源系统为线圈系统提供稳定可控的直流电流,即需要提供 45 kA ($2.1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$) 和 35.6 kA ($1 \text{ m}/0.5 \text{ T}$) 两种电流,

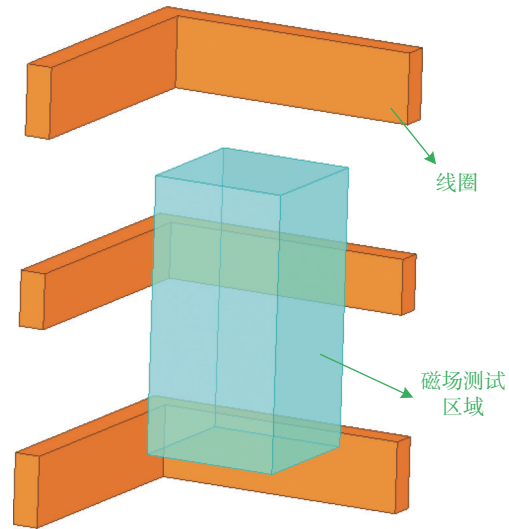


图10 三线圈的1/4模型

Fig. 10 1/4 model of the three-coil

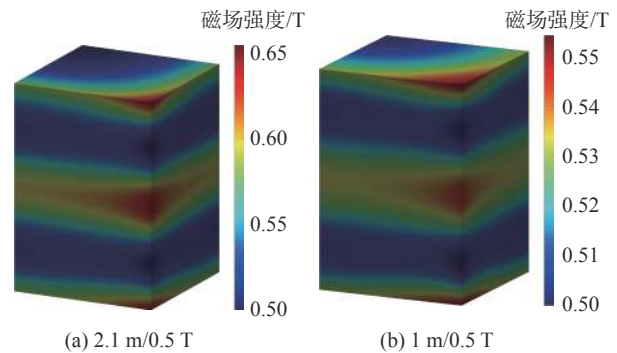


图11 试验区域内三个线圈的磁场分布(1/4)

Fig. 11 Magnetic field distribution (1/4) of the three coils in the test area

可使用 ITER 现有的直流电源测试平台提供,可输出 $\pm 55 \text{ kA}$ 、 $\pm 1050 \text{ V}$ 的电源,设备参数如表4所示,可以看出其输出足以满足需求。

表4 ITER 直流电源测试平台的设备参数

Tab. 4 Equipment parameters of DC power test platform for ITER

| 参数 | 值 |
|-------------------|---------------------|
| 容量/ MVA | 82 |
| 电压 | 66 kV/1.0 kV |
| 短路阻抗 | $16\%^{+7.5\%+1\%}$ |
| 输出电流/ kA | ± 55 |
| 输出电压/ kV | ± 1.05 |

3.2 直流瞬态磁场测试电源

基于图3所示的电路拓扑,假设峰值充电电流为 I_0 ,无论换向时间如何,线圈电流可以表示为:

$$\begin{cases} i_L = I_0 e^{-t/\tau} \\ \tau = \frac{L}{R + R_0} \end{cases} \quad (6)$$

如果线圈的磁场产生效率定义为 K , 则相应的磁场变化率为:

$$\frac{dB}{dt} = K \frac{di_L}{dt} = -\frac{KI_0(R+R_0)}{L} e^{-t/\tau} \quad (7)$$

磁场变化率要求在 14 T/s 到 30 T/s 之间; 也就是说, 最大磁场变化率为 30 T/s。

$$\frac{KI_0(R+R_0)}{L} = 30 \text{ T/s} \quad (8)$$

如果要求磁场变化率在 14 T/s 和 30 T/s 之间保持 50 ms, 则:

$$30e^{-50/\tau} = 14 \Rightarrow \tau = \frac{L}{R+R_0} = 65.6 \text{ ms} \quad (9)$$

(1) 2.1 m/0.5 T 线圈

对于 2.1 m/0.5 T 线圈, 可计算 $L=5.27 \text{ mH}$ 、 $R=1.47 \text{ m}\Omega$ 和 $R_0=79 \text{ m}\Omega$ 。对于该线圈, 其磁场产生效率为 $K=11.1 \text{ mT/kA}$, $I_0=177.3 \text{ kA}$, 假设能量放电电阻的温升上限设置为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, 并采用不锈钢电阻, 则相应的线圈储能为 82.83 MJ , 相应的重量约为 2.25 t 。试验期间的放电电流波形如图 12 所示(假设变流器的输出电压为 500 V)。

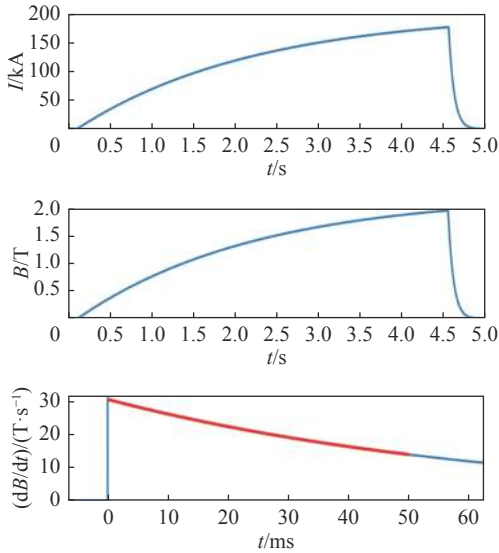


图 12 2.1 m/0.5 的线圈电流、磁场和变化率波形图
Fig. 12 Waveform diagram of the coil current, magnetic field and change rate of 2.1 m/0.5

(2) 1 m/0.5 T 线圈

对于 1 m/0.5 T 线圈, 可计算 $L=0.983 \text{ mH}$ 、 $R=$

$0.514 \text{ m}\Omega$ 和 $R_0=14.5 \text{ m}\Omega$ 。对于该线圈, 其磁场产生效率为 $K=14 \text{ mT/kA}$, $I_0=140.6 \text{ kA}$, 相应的线圈储能为 9.72 MJ , 相应的重量约为 0.26 t 。试验期间的放电电流波形如图 13 所示。

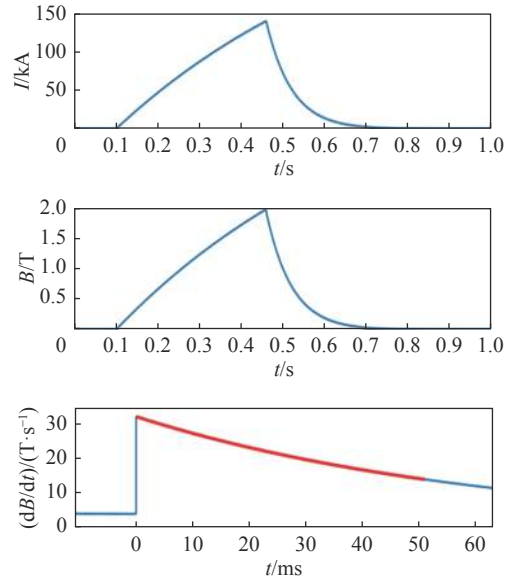


图 13 1 m/0.5 的线圈电流、磁场和变化率波形图
Fig. 13 Waveform diagram of the coil current, magnetic field and change rate of 1 m/0.5

最终的方案如表 5 所示。

表 5 电源方案
Tab. 5 Power scheme

| 类型 | 直流稳态 | 直流瞬态 |
|-------------|------------------|------------------------|
| 测试需求 | 0.5 T | 14 T/s~30 T/s (>50 ms) |
| 2.1 m/0.5 T | 45.0 kA/2.981 MW | 82.83 MJ/79 mΩ |
| 1 m/0.5 T | 35.6 kA/0.651 MW | 9.72 MJ/14.5 mΩ |

4 结论

聚变装置 ITER 相关电气电子设备所需的磁场抗扰度测试系统, 分析和设计了方形螺线管线圈系统和方形三线圈系统, 并提出相应的了直流电源功率/电流的参数。根据 ITER 组织针对设备体积的要求, 设计了 2.1 m/0.5 T 和 1 m/0.5 T 线圈结构, 使用解析法和有限元法计算了最佳结构参数, 并对其磁场性能进行了比较分析。确定了功耗较小的方形螺线管为最终结构。同时, 分析了直流暂态的功率拓扑, 计算了相关参数, 为实际制造提供了理论依据。

参考文献:

[1] 黄亚. ITER 大口径均匀强磁兼容测试装备研制 [D]. 合肥: 中

- 国科学技术大学, 2021. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2021.000074](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2021.000074).
- HUANG Y. The development of the large-caliber uniform high intensity magnetic compatibility test equipment for ITER [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2021.000074](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2021.000074).
- [2] RYFF, PETER F. Current distribution in helical solenoids [J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1972, IA-8(4): 485-490. DOI: [10.1109/TIA.1972.349840](https://doi.org/10.1109/TIA.1972.349840).
- [3] CONWAY J T. Exact solutions for the magnetic fields of axisymmetric solenoids and current distributions [J]. *Magnetics IEEE Transactions on*, 2001, 37(4): 2977-2988. DOI: [10.1109/20.947050](https://doi.org/10.1109/20.947050).
- [4] LIN Q G. An approach to the magnetic field of a finite solenoid with a circular cross-section [J]. *European Journal of Physics*, 2021, 42(3): 035206 (18pp). DOI: [10.1088/1361-6404/abd4c8](https://doi.org/10.1088/1361-6404/abd4c8).
- [5] FIRESTER, ARTHUR H. Design of square helmholtz coil systems [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1966, 37(9): 1264-1265. DOI: [10.1063/1.1720478](https://doi.org/10.1063/1.1720478).
- [6] CROSSER M S, SCOTT S, CLARK A, et al. On the magnetic field near the center of Helmholtz coils [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(8): 832-380. DOI: [10.1063/1.3474227](https://doi.org/10.1063/1.3474227).
- [7] BEIRANVAND R. Analyzing the uniformity of the generated magnetic field by a practical one-dimensional helmholtz coils system [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(7): 08D9 04-1. DOI: [10.1063/1.4813275](https://doi.org/10.1063/1.4813275).
- [8] BEIRANVAND, REZA. Effects of the winding cross-section shape on the magnetic field uniformity of the high field circular helmholtz coil systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 7120-7131. DOI: [10.1109/TIE.2017.2686302](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686302).
- [9] YANG Y, SONG Z Q, JIANG L, et al. An improved two-coil configuration for low-frequency magnetic field immunity tests and its field inhomogeneity analysis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10): 8204-8214. DOI: [10.1109/TIE.2018.2807420](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2807420).
- [10] HUANG Y, FU P, JIANG L, et al. Design and error analysis of a large-caliber steady-state magnetic-field testing system [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56(99): 1-9. DOI: [10.1109/TMAG.2019.2958567](https://doi.org/10.1109/TMAG.2019.2958567).
- [11] HUANG Y, JIANG L, FU P, et al. Optimal design method to improve the magnetic field distribution of multiple square coil systems [J]. *IEEE Access*, 2020, 8(9): 171184-171194. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3024653](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3024653).
- [12] HUANG Y, JIANG L, FU P, et al. Temperature field calculation and water cooling design of the magnetic field immunity testing system [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2021, 170(9): 112515. DOI: [10.1016/j.fusengdes.2021.112515](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112515).
- [13] GOTTARDI G, MESIRCA P, AGOSTINI C, et al. A four coil exposure system (tetracoil) producing a highly uniform magnetic field [J]. *Bioelectromagnetics*, 2003, 24(2): 125. DOI: [10.1002/bem.10074](https://doi.org/10.1002/bem.10074).
- [14] PANG H, DUAN L, QUAN W, et al. Design of highly uniform three dimensional spherical magnetic field coils for atomic sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, PP(99): 1-1. DOI: [10.1109/JSEN.2020.2997800](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2997800).
- [15] RUBENS, SIDNEY M. Cube - surface coil for producing a uniform magnetic field [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1945, 16(9): 243-245. DOI: [10.1063/1.1770378](https://doi.org/10.1063/1.1770378).
- [16] PAN D, LIN S, LI L, et al. Research on the design method of uniform magnetic field coil based on the MSR [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(2): 1348-1356. DOI: [10.1109/TIE.2019.2899544](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2899544).
- [17] XU J, KANG X, FAN Z, et al. Design of highly uniform magnetic field coils with wolf pack algorithm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, PP(99): 1-1. DOI: [10.1109/JSEN.2020.3030622](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3030622).
- [18] YONG H H, HAN B H, LEE S Y. Magnetic propulsion of a magnetic device using three square-helmholtz coils and a square-Maxwell coil [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2010, 48(2): 139. DOI: [10.1007/s11517-009-0574-5](https://doi.org/10.1007/s11517-009-0574-5).
- [19] JIN Y, LI L, PAN D, et al. Analysis and design of a uniform magnetic field coil with a magnetic shield based on an improved analytical model [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, PP(99): 1-1. DOI: [10.1109/TIE.2021.3066929](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3066929).
- [20] ALLDRED J C, SCOLLAR I. Square cross section coils for the production of uniform magnetic fields [J]. *Journal of Scientific Instruments*, 1967, 44(9): 755. DOI: [10.1088/0950-7671/44/9/327](https://doi.org/10.1088/0950-7671/44/9/327).
- [21] MERRITT R, PURCELL C, STROINK G. Uniform magnetic field produced by three, four, and five square coils [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1983, 54(7): 879-882. DOI: [10.1063/1.1137480](https://doi.org/10.1063/1.1137480).

作者简介:



许雪松

许雪松 (第一作者)

1986-, 男, 安徽合肥人, 工程师, 安徽农业大学机械设计与自动化学士, 主要从事聚变电源的机械及电气设计(e-mail)xxsong@ipp.ac.cn。



黄亚

黄亚 (通信作者)

1990-, 男, 安徽六安人, 博士后, 中国科学技术大学核能科学与工程博士, 主要从事 EMC 分析(e-mail)ya.huang@ipp.ac.cn。

(责任编辑 李辉)