

# EAST 超导磁体线圈电阻测量系统优化

钱 静<sup>1</sup> 孙 越<sup>2</sup> 陈滋健<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院等离子体物理研究所,合肥,230031;

<sup>2</sup>合肥工业大学电气与自动化工程学院,合肥,230009;<sup>3</sup>合肥海奥电气有限公司,合肥 230030

收稿日期:2012-12-14;修回日期:2013-03-11

**【摘要】** EAST 装置超导磁体系统包括 30 个超导磁体线圈,超导磁体线圈电阻测量是对当前磁体性能是否退化等进行判断的重要一环.本文介绍了 EAST 超导磁体线圈电阻测量系统当前存在的问题、优化设计以及样机实验运行结果.

**关键词:** 超导线圈电阻,测量系统,优化设计

**PACC:** 0720.0750

## MODIFICATION OF THE COIL RESISTANCE MEASUREMENT SYSTEM FOR THE EAST SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM

QIAN Jing<sup>1</sup> SUN Yue<sup>2</sup> CHEN ZH-jian<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;

<sup>2</sup>Hefei University of Technology, Hefei, 230009; <sup>3</sup>Hefei Hai'O electric Ltd. Hefei 230030

Received date:2012-12-14;revised manuscript received date:2013-03-11

**【Abstract】** The EAST SC (abbr. of superconducting) magnet system is consist of 30 SC coils. The SC coil resistance measurement is a key point to decide if there is any performance degradation in the current SC magnet system. Existent problems and modification design of the coil resistance measurement system for the EAST Superconducting Magnet System are described in the paper. Testing results of the modification prototype in the last EAST campaign are also introduced.

**Keywords:** EAST, Superconducting coil resistance, modification design

**PACC:** 0720.0750

## 1 引 言

EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)装置是中国自主研发的具有非圆截面、主动冷却等特点的全超导核聚变托卡马克实验装置<sup>[1]</sup>. EAST 装置目标在于长脉冲、H 模和偏滤器形态的等离子体放电实验运行<sup>[2]</sup>. EAST 超导磁体

系统主要包括 16 个 D 型纵场(TF)超导磁体线圈和 14 个极向场(PF)超导磁体线圈,图 1 为 EAST 纵场磁体及其支撑和极向场磁体的示意图.每个磁体线圈由 NbTi 合金和分离铜股线经多级绞缆形成的 CICC 导体(abbr. of cable-in-conduit conductor)绕制而成<sup>[3]</sup>.超导磁体系统线圈用超临界氦(SHE)冷却,工作温度  $T_{op}$  为 4.5K,低温制冷系统具有 3.8K 的冷却能力<sup>[4]</sup>.

在 2006 年至今的 EAST 工程实验运行和 6 轮正式实验运行的降温阶段,需要监测超导磁体系统的每个线圈电阻.采用四线法测量线圈电阻信号,其中输入恒流源幅值为 1A/0.5A.通过测量所得的线圈电阻,计算得到各个超导线圈的 RRR 值并捕获各个超导线圈的超导转变温度  $T_c$ ,监控磁体相关性是否存在退化,并确认所有线圈是否进入超导态以及在正常运行温度  $T_{op}$  时,超导线圈发生失超的可能性低<sup>[5]</sup>,从而保障磁体系统在装置等离子体放电阶段的安全运行.EAST 超导磁体线圈从常温降温到完全进入超导态通常历时 15~20 天,其超导线圈电阻常温下在  $10\sim 10^2$  m $\Omega$  量级;随着线圈温度的降低,线圈电阻值逐渐缓慢下降,当线圈温度到达超导转变温度  $T_c$  时,线圈电阻幅值从  $1\sim 10^{-1}$  m $\Omega$  量级左右迅速下降为 0,超导转变时间在秒到  $10^3$  秒量级.如图 2 所示为在 2012 年 EAST 实验运行降温阶段超导线圈 TF#11 电阻与温度的变化曲线,可见超导转变发生在 TF#11 出口温度为 8.56K 左右,该线圈电阻值由 1.477m $\Omega$  历时 3 秒即突降为 0.此时认为超导线圈 TF#11 完全进入超导态.



图 1 EAST 纵场磁体及其支撑和极向场磁体示意图

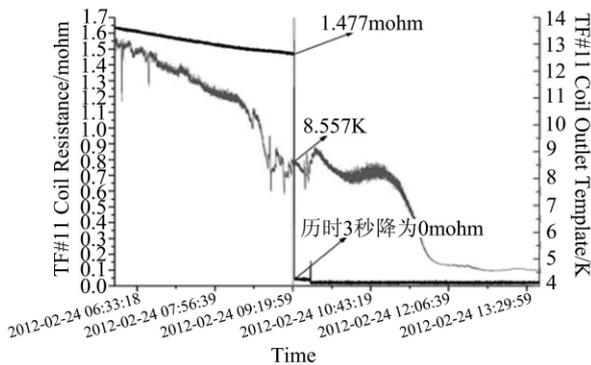


图 2 降温阶段超导线圈电阻与温度的变化曲线

## 2 超导磁体系统线圈电阻测量系统

目前 EAST 超导磁体系统线圈电阻采取的测

量模式框架图如图 3 所示.这种测量模式下,线圈电阻信号测量电缆共 43 根双芯高压屏蔽线,单根线长约 120 米.测量电缆从 EAST 装置现场法兰引出,经由现场不锈钢走线槽,传送信号到实验运行分控室.在分控室内对传送来的原始电位信号进行低通滤波、放大等信号调理和计算机监控.系统存在以下缺点:

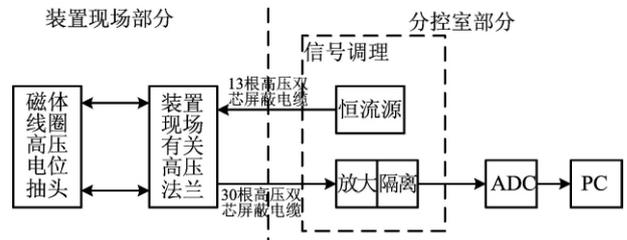


图 3 超导磁体系统线圈电阻测量模式

- (1)长距离信号传输使得信号容易在传输路径上受到环境空间噪声的干扰;
- (2)信号测量电缆电阻约 12 $\Omega$ ,远大于有效信号电阻(最大不超过 150m $\Omega$ ),要求恒流设备输出功率较大;
- (3)各种类型的信号电缆一起走线不易于排查故障,且各种信号电缆已造成进线槽口堵塞.其中的高压信号电缆万一有绝缘破损,可能产生严重后果.
- (4)系统包括较多分立设备:
  - a. 14 台恒压恒流源(30W、0~5V、0~3A);
  - b. 4 台 30 路精密高压隔离放大器;
  - c. 进线端子柜;
  - e. 2 台机柜.一台用于放置恒流源和 phoenix 转接端子排;一台用于放置放大器和计算机监控设备.

实验降温期间,EAST 装置磁体系统对地绝缘测试比较频繁,需要动作 phoenix 转接端子排的刀闸以断开装置与恒流设备的连接,而断开放大器与装置的连接则需要将 30 根双芯信号电缆从进线端子上拆除.

## 3 超导磁体系统线圈电阻测量系统优化设计

根据测量点与测量设备尽可能近<sup>[6]</sup>以及改善当前系统存在的缺点的原则,对 EAST 超导磁体系统线圈电阻测量系统进行优化设计.首先采用优化测量模式,即信号调理和测量在装置现场实现,而分控室和现场之间的连接仅有 2 根电源电缆和 8 根双向

数字通讯光纤. 优化测量模式框架图如图 4 所示, 优化后的测量系统设备工作原理图如图 5 所示. 优化后的线圈电阻测量系统具有以下优点:

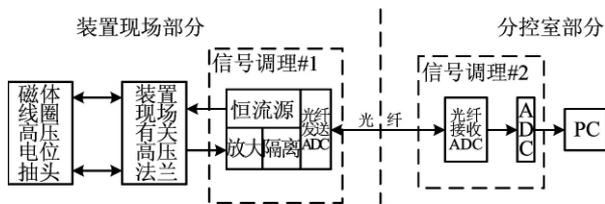


图 4 超导磁体系统线圈电阻测量模式优化

1) 增强系统抗干扰能力

- a. 就近测量以及数字信号光纤传输避免了模拟量信号由于长距离传输路径而耦合噪声.
- b. 标准机柜、符合欧标的 CPCI 机箱、模件、接插件等的选用有效屏蔽了装置现场的电磁干扰.
- c. 使用电阻测量系统专用的隔离稳压电源, 而非从装置现场直接取电.

2) 提高测量精度

- a. 输出恒流幅值精度从 10% 提高到 1%, 且 24 小时运行测试中电流幅值的变化仅在  $\mu A$  量级;
- b. 现场测量设备前级采用仪用差分放大器, 其输入阻抗与信号源内阻比值约  $4 \times 10^4$ . 采用了标准电压源作为参考电压, 可靠修正一级放大的零点.

3) 提高系统集成度

就近测量使得信号测量电缆电阻降低为  $3 \sim 5 \Omega$ , 则恒流设备的输出功率只需要 7W 左右, 可以将恒流输出功能与其它信号调理功能集成到一台设备.

4) 便于运行人员操作和维护

a. 现场设备采用高压干簧继电器建立 EAST 装置磁体系统线圈电阻信号与测量系统的连接. 在超导磁体系统进行绝缘测试时, 可在现场用手动按钮或在分控室内用计算机远程设置控制继电器的通/断来实现测量系统与装置的连接/断开.

b. 恒流输出电缆不再通过端子排和接线柱, 而是通过连接可靠、使用方便的 LEMO 器件与现场设备实现连接. 恒流输出幅值 1A/0.5A 的选择也可以手动或计算机远程设置实现.

5) 减少了分立设备, 测量模式优化后的分立设备如下:

- a. 现场设备 4 台;
- b. 分控室设备 5 台, 其中 4 台为信号接收和还原设备, 1 台与计算机监控系统通讯, 从而实现计算机远程控制;
- c. 机柜 2 台, 一台用于放置现场设备, 一台用于放置分控室设备和计算机监控设备.

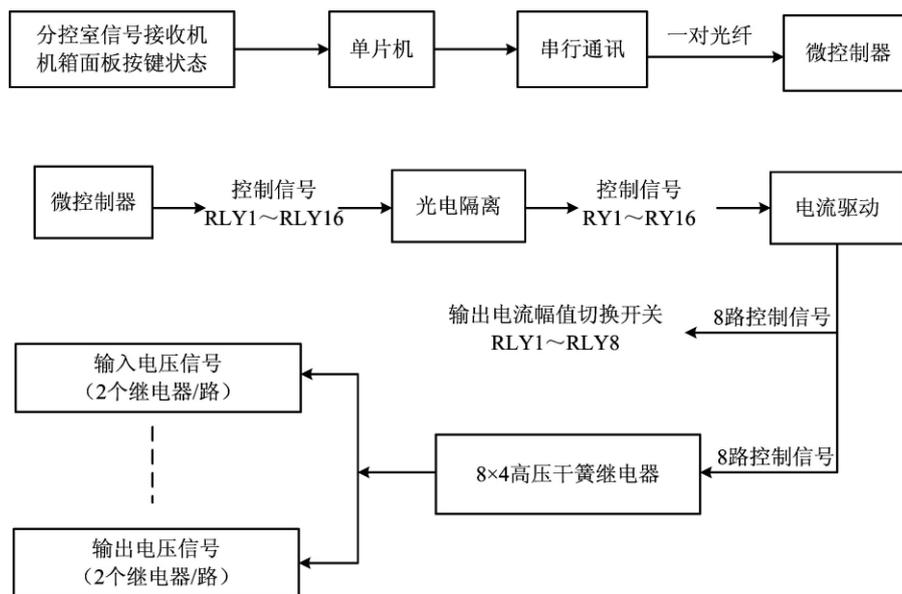


图 5 测量系统设备工作原理图

### 4 线圈电阻测量系统优化样机实验运行结果

根据线圈电阻优化设计研制了样机, 并参加了 2012 年春季实验运行. 如图 6 是超导线圈电阻测量

系统优化样机与现有测量系统设备测量的线圈电阻值对照曲线图.

整个 EAST 装置降温运行过程中,

(1) 优化系统设备测量值与旧系统设备测量值之间的误差在常温区不超过  $1 m\Omega$ , 在液氮温区不超

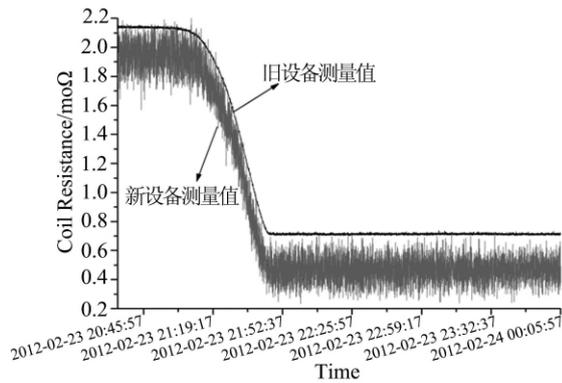


图6 超导线圈电阻测量系统优化样机  
2012年实验运行曲线

过  $0.4 \text{ m}\Omega$ .

(2) 通过与直接使用 7 位半精度的数字万用表测量的结果相对照, 使用优化系统设备测量值更为精确, 其测量值与实际值之间的误差低于  $0.1 \text{ 毫欧}$ , 优于旧系统设备测量值.

(3) 旧系统设备测量电阻值在常温区呈阶梯状变化, 是由于低通滤波的截止频率 ( $6 \text{ Hz}$ ) 过低造成的.

(4) 优化系统设备的不足之处在于整个温区的噪声比较多, 这是由于样机现场设备低通滤波的截止频率为  $100 \text{ Hz}$ , 相对原始信号频率过高造成的, 可以通过适当降低截止频率来降噪.

## 5 结 论

综上所述, 线圈电阻测量系统优化样机具有抗干扰性能优, 测量精度高, 操作维护方便等优点, 经过调整现场设备低通滤波截止频率为  $20 \text{ Hz}$  等进一步优化措施后, 可以更好地实现 EAST 装置实验中对超导磁体系统性能的判断, 保障超导磁体系统安全运行.

## 参 考 文 献

- [1] 陈灼民, 钱静, 等. 低温与超导, **35**(2007), 93~95, 102.
- [2] B. Wan, etc. *Fusion Engineering and Design*, **85** (2010), 1048~1053.
- [3] J. Qian, etc. *Fusion Engineering and Design*, **85** (2010), 828 - 835.
- [4] 陈飞云, 龙凤等, 低温物理学报, **33**(2011), 301~304.
- [5] P. D. Weng, Y. F. Bi and etc. *Cryogenics*, **40** (2000), 531 ~538.
- [6] 高晋占, 《微弱信号测量》, 清华大学出版社, 北京(2004年), P52.