

基于射频波技术的新型失超检测方法 *

余 彬^{1,2},胡燕兰^{1†}

1.中国科学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

收稿日期:2018-12-29;接收日期:2019-03-05

【摘要】 失超检测对于大型超导装置(例如 EAST、ITER 等全超导托克马克聚变装置)的长期稳态运行至关重要。本文目的是探索一种新型失超检测方法(射频波法)并评估其实际使用价值。首次将射频波技术应用于失超检测,根据射频传输线理论,设计了一套新型失超检测系统。通过端电压和射频失超检测方法同时检测 Bi2223 带材绕制的线圈的失超情况,以电压法作为参考依据评判射频检测方法的效果。多次实验证明,射频波法能够用于失超检测,在线圈电阻变为几十个微欧的时候就能够检测出失超。在小线圈上实现可重复检测实验。并在实验中获得了很多有用的信息以进一步改进该方法。

关键词: 失超检测,Bi2223 线圈,射频波

PACS: 74.90.+n, 28.52.-s, 32.30.Bv

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.004

引用方式: 余彬,胡燕兰, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0028 (2019)

A Novel Quench Detection Method using Radio Frequency Wave Technology *

YU Bin^{1,2}, HU Yanlan^{1†}

1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Received date: 2018-12-29; accepted date: 2019-03-05

【Abstract】 Quench detection is very important for long-term steady-state operation of large superconductivity devices such as EAST, ITER, and other full superconductivity Tokemac fusion devices. The purpose of this paper is to explore a new type of quench detection method (RF method) and evaluate its practical use value. For the first time, radio frequency wave technology is applied to quench detection. According to the theory of radio frequency transmission line, a new type of quench detection system is designed. The terminal voltage and RF quench detection method are used to simultaneously detect the quench condition of the coil wound by Bi2223 strip. The voltage method is used as a reference to judge the effect of the radio frequency detection method. Many experiments have proved that the RF wave method can be used for quench detection, and the quench can be detected when the coil resistance becomes several tens of $\mu\Omega$. Repeatable detection experiments were performed on the small coils. And a lot of useful information was obtained in the experiments to further improve the method.

Keywords: Quench detection, Bi2223 coil, Radio frequency wave

PACS: 74.90.+n, 28.52.-s, 32.30.Bv

DOI: 10.13380/j.ltpl.02019.01.004

Reference method: YU Bin, HU Yanlan, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0028 (2019)

* 国家磁约束核聚变能发展研究专项(批准号:2014GB105004)资助的课题。

† yanlanghun@ipp.ac.cn

1 引言

未来商用核聚变堆必须采用全超导磁体系统才能实现稳态运行,磁体系统是托克马克聚变装置最重要最昂贵的部件之一^[1].为了产生足够大的磁场来约束等离子体,超导磁体必须要通大电流(ITER 的 TF 线圈的设计电流为 68 kA^[2]).在此前提下,磁体系统储存着巨大的能量,失超的基本过程就是储存的电磁能转变为热的过程,局部过热可能因热应力造成磁体损坏,同时失超也可能产生高电压引起绝缘击穿^[3].因此,及时的发现失超并采取有效的保护措施是非常重要的.有效的失超检测和保护,是超导聚变装置长期安全运行重要环节^[4].

目前主流的检测方法是电压检测法,EAST 主要采用同绕线检测法^[5](该方法的主要目的是减小电压测检测法的电磁干扰).这种方法需要在装置内部安装电压抽头、引线和同绕线,一旦故障,维护和修复非常困难.温度检测^[6]、流量检测^[7]等作为后备保护方法.这些后备保护方法存在延迟非常严重的缺陷,而且通常需要多布点,不利于检修.除此之外,还有光纤法^[8]、声发射检测法^[9] 和超声波检测法^[10].超声波检测法和声发射检测法由声波性质决定了易受到声波的干扰引起误动.易受干扰,且对动作十分准确的定性、定量表征仍有困难.而射频波失超检测方法是一种无损、主动的检测方法^[11](只需要往导体注入和接收射频波,再进行信号处理,不需要安装其他传感器或者引线).相较于电压法具有检修方便的优点;相对于温度、压力和流量检测,具有小延迟、不需要多布点的优势.而且该方法不需要线圈通电的情况下就可以检测到是否失超,而电压检测法,温升检测法,压力检测法,流速检测法全都依赖于通电流.EAST 曾出现过未通电已失超的情况.

本文所论述的失超检测方法是新型失超检测方法,是首次将射频波技术应用于失超检测.射频波法是对现有失超检测方法的一个很好的补充.

2 原理及仿真

2.1 理论模型

本文主要是探索一种全新的失超检测技术,即采用微波传输线行波探测技术来诊断超导失超现象^[12].通过观察超导体电阻变化引起的反射波参量变化来快速诊断超导体失超现象,从而通过断路起

到失超保护的目的.

信号沿传输线向前传播时,每时每刻都会感受到一个瞬态阻抗,这个阻抗可能是传输线本身的,也可能是中途或末端其他元件的.如果信号感受到的阻抗是恒定的,那么他就会正常向前传播,只要感受到的阻抗发生变化,不论是什么引起的(可能是中途遇到的电阻,电容,电感等),信号都会发生反射^[13].磁体从超导状态往正常态转化的过程中,磁体的阻抗变化会导致射频波的反射参量发生变化^[14].因此,通过监测反射参量的变化可以判断超导体是否失超.

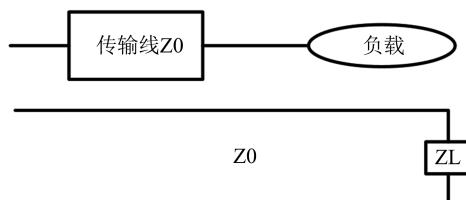


图 1 射频波传输简化模型

Fig.1 Simplified model of RF wave transmission

2.2 仿真模拟

根据传输线理论,在负载处的反射系数^[15]:

$$\Gamma_0 = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

其中, Z_L 为负载阻抗(R 为阻抗实部, X 为阻抗虚部), Z_0 为传输线特征阻抗 50Ω .对于超导带材来说,在超导状态下 $R=0$, $X=0.00014$.为了观察随着磁体失超,反射系数的变化趋势,做了在实部 $0 \sim 1 \text{ m}\Omega$,虚部 $0 \sim 2j$ 的范围内的仿真.反射系数的仿真结果如图 2:

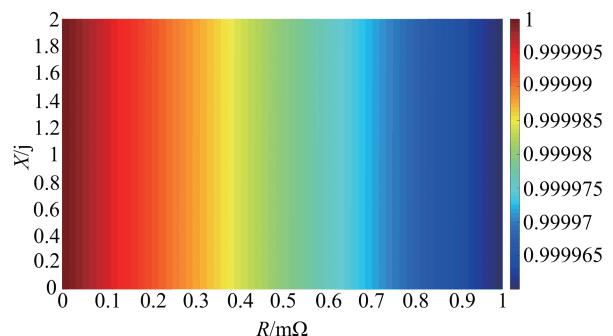


图 2 阻抗变化对反射率影响仿真图

Fig.2 Simulation of the effect of impedance change on reflectivity

图 2 的横轴代表阻抗实部,纵轴代表阻抗虚部,图中颜色代表反射率大小.通过上图我们发现阻抗

虚部的变化对反射率的影响几乎可以忽略,阻抗实部对反射率的影响相对较为明显。虽然阻抗实部对反射率的影响非常微弱,但是适当的信号处理可以弥补这一缺陷。因此,利用检测射频功率变化来检测失超是可行的。

3 系统设计

从本检测方法的原理来看,要达到检测目的的关键在于两点:1、保证射频功率能顺利、尽可能多的进入线圈;2、如何正确的检测到功率变化。

由于 Bi2223 线圈具有一定的电感,对于射频波来说,该线圈会产生感抗^[16]。进而阻碍射频功率的进入,因此需要将线圈进行阻抗匹配^[17]。所以射频信号在进入线圈之前需要通过巴伦进行匹配^[18]。另外,射频波会在阻抗不均匀处发生反射,如果反射功率回到功率源,会对功率源造成干扰。因此应该用隔离器阻止反射功率返回功率源^[19]。

根据前面的仿真结果可知,系统在失超状态时,由于需要在电阻变化较小的情况下实现检测,变化功率相对载波功率非常小。系统设计中考虑采用多种对消方式降低载波功率,并放大变化功率部分,以达到稳定可靠检测的目的^[20]。系统首先采用固有的对消信号,抵消载波中不变换的部分,通过放大器对剩余载波和变化功率同时进行放大。单次对消一般能够实现 15 dB 左右的改善。为实现较好的射频对消,必须采用多次对消方案。

根据上述分析,该诊断系统主要由射频源、环形隔离器、巴伦和射频检测系统组成,如图 3 所示。

简化分析变化的载波信号数学表达为: $[A + Bf(t)] * \cos(\omega t + \Delta\varphi)$,其中 A 为射频波的基波分量的幅值,f(t)为失超后电阻变化对反射功率的影响, $\Delta\varphi$ 为失超后反射波相位的变化分量。由混频原理可知,进行同频混频后,其表达式为: $1/2 [A +$

$Bf(t)] * \cos(\Delta\varphi) + 1/2 [A + Bf(t)] * \cos(2\omega t + \Delta\varphi)$,显然可以利用滤波电路实现对 $2\omega t$ 高频分量的滤除。系统进行同频混频后剩余的分量主要是功率电平转换的直流分量和变化分量以及相位变化分量部分。而相位变换分量基本在 0.1 度以下,因此 $\cos(\Delta\varphi)$ 近似等于 1,系统变化分量被分成了直流分量和一个缓变分量,检测难度大大降低。

4 实验过程

实验检测样本如图 4 所示,其参数如表 1 所示。实验线材采用 Bi2223 超导带材,尺寸 4.8 mm * 0.27 mm;线圈采用双饼结构,一共 2 层共 38 匝;总长约 9 米;线圈内侧和骨架之间用 0.03 mm 厚聚酰亚胺薄膜绝缘;单饼间用 0.2 mm 环氧板隔离;整体不固化,线圈外侧采用可拆卸式固定;临界电流 100 A 左右。

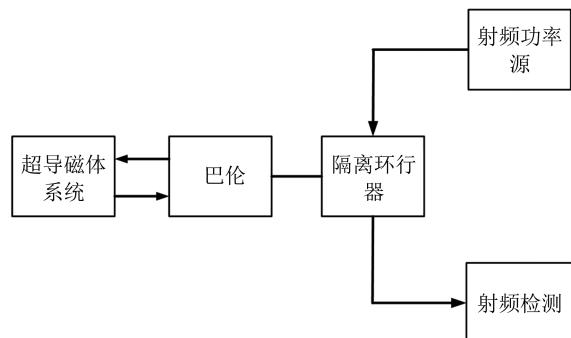


图 3 系统设计

Fig.3 System design



图 4 实验线圈

Fig.4 Experimental coil

表 1 实验测试线圈参数

Table 1 Parameters of experimental test coil

线圈带材	内径/mm	外径/mm	高度/mm	长度/m	匝数	电感/mH
Bi2223(高温超导带材)	60.4	70.66	9.8	9	38	0.141

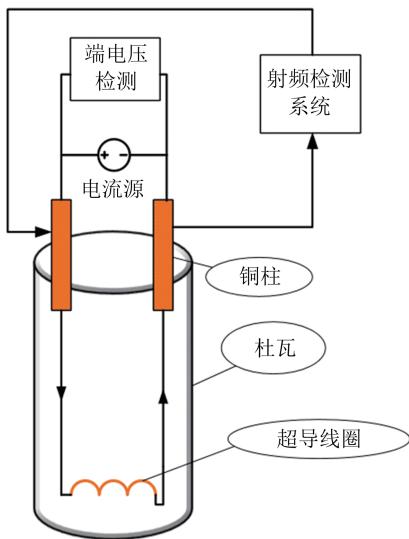


图 5 实验电路

Fig.5 Experimental circuit

实验电路如图 5 所示,由射频源产生射频信号,该信号经过环形隔离器和巴伦之后进入超导线圈,然后由射频检测系统检测.采用液氮浸泡冷却线圈,通过给磁体通大电流使其失超.在实验过程中使用

端电压和射频波法检测失超情况.并将两种检测结果进行对比.

5 实验结果与讨论

根据图 5 的实验电路进行实验,实验结果如图 6 所示:

从图 6 来看,射频诊断信号几乎是与端电压信号同步.根据高温超导体 $1 \mu\text{V} / \text{cm}$ 的标准,我们选取 1 mV 作为电压失超判据.在 99 s 处端电压值达到 1 mV ,即在 99 s 处失超.而射频诊断信号在 104 s 处出现明显变化,相对于电压法来说有 5 s 的延迟,此时线圈的电阻值大约为 $35 \mu\Omega$.我们做了多次实验,延迟大部分都在 5 s 左右.如果想要降低延迟,提高射频诊断信号的稳定性是一个非常有效的途径.从图上来看射频诊断信号一直有波动,不如端电压信号稳定.如果能提高射频诊断信号的稳定性可以改善其延迟.另外,本次选用的实验样本是高温超导带材,相对于低温超导带材来说,其失超过程更为温和缓慢.因此,如果将实验样本替换为低温超导线圈,延迟应当也会明显降低.

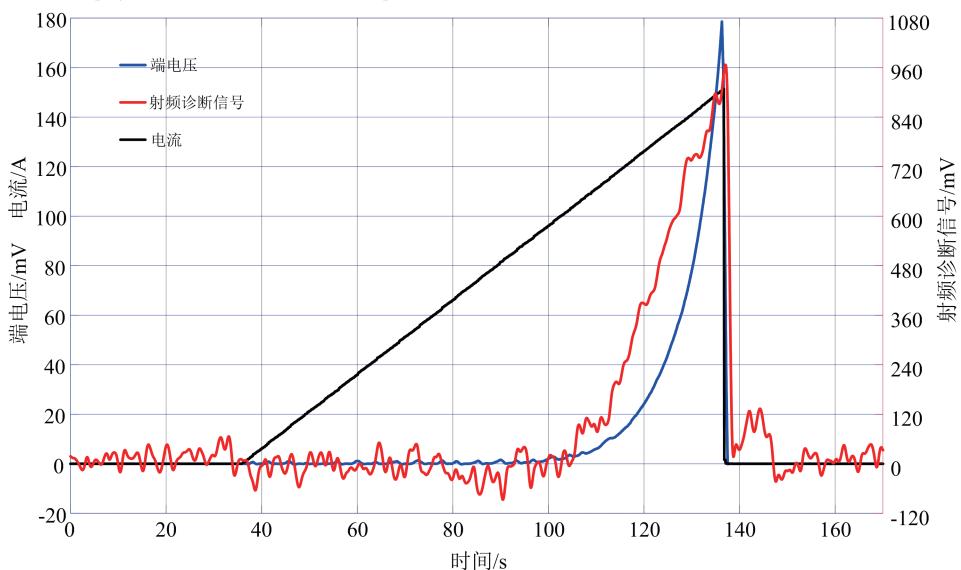


图 6 射频检测结果

Fig.6 Detection result of RF wave method

连续多次重复射频波失超检测结果如图 7:

从图 7 来看,射频波失超检测方法具有较好的可重复性.也再次反映了射频诊断信号的波动问题.提高射频诊断信号的稳定性是我们后续工作的重点之一.

6 结 论

本文所论述的失超检测方法是新型失超检测方法,是首次将射频波技术应用于失超检测,并没有前人工作可以参考.

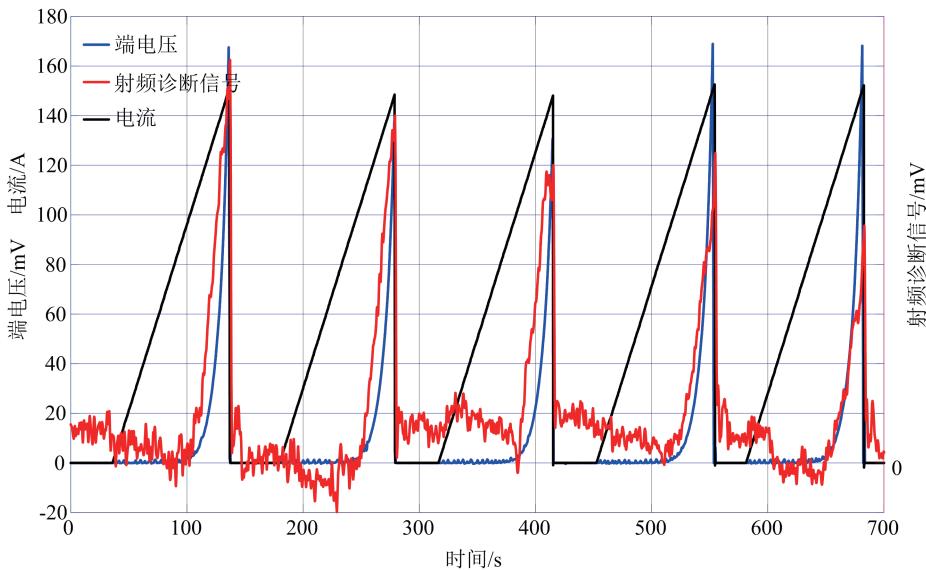


图 7 射频检测重复性实验

Fig.7 Detection result of RF wave method

从实验结果来看,射频波失超检测方法能较好的完成失超检测工作。射频诊断信号较好地反映了导体阻抗变化。射频诊断信号是正确的失超诊断依据。目前,射频波法在线圈电阻变为几十个微欧的时候就可以检测出来失超。射频诊断信号与导体是否通电没有关系。因此,在导体通电前射频波法可以检查超导体阻抗以决定是否予以通电。

但是也反映了本次实验的一些不足。首先,相对于电压判别法来说,存在几秒的延迟。由于低温超导

线圈的失超会更加剧烈,因此应用于低温超导线圈其延迟应会得到明显改善。其次,射频诊断信号总有波动存在,不够稳定。

后续希望通过改进射频源和算法来解决射频诊断信号的稳定性问题,进而可以改善延迟。本次实验证明,射频波法完全具有作为后备失超诊断方法的潜力并且具有其独特优势(无需于超导装置内部安装传感器和引线;可用于超导体通电前检查阻抗)。

参 考 文 献

- [1] 胡燕兰 2013 博士学位论文(合肥:中科院等离子体物理研究所)。
- [2] Kajitani H. , Hemmi T. , Uno Y. , Shimizu T. , Yamane M. , & Nakamoto M. , *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **28**(2018), Art no. 4202205.
- [3] 宋庆砾 2006 硕士学位论文(武汉:华中科技大学)。
- [4] 胡燕兰,吕环宇,朱则英,陆建华 核电子学与探测技术 **30** (2010), 1246.
- [5] Hu Y. , Li J. , Shen B. , Lv H. , Xiao Y. Z. , *Fusion Engineering and Design*, **88**(2013), 73.
- [6] Kim D. , Kim J. G. , Kim A. R. , Park M. , Yu I. K. , Sim K. D. , *IEEE Trans. Appl. Supercond.* ,**21**(2011) , 2462.
- [7] Loyd R.J., Bule A.M., Chang C.L. , *IEEE Trans. Magn.* ,**27** (1991) , 1716.
- [8] Scurti F. , Ishmael S. , Flanagan G. , Schwartz J. , *Superconductor Science and Technology* , **29**(2016),03LT01.
- [9] Marchevsky, M.Sabbi, G.Bajas, H.Gourlay, S. *Cryogenics* , **69**(2015), 50.
- [10] Ninomiya A. , Sakaniwa K. , Kado H. , Ishigohka T. , Higo, Y , *IEEE Trans .Magn.* , **25**(1989) , 15203.
- [11] Gao B. , Zhang H. , Woo W. L. , Tian G. Y. , Bai L. , Yin A. , *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement* , **63** (2014), 923.
- [12] Kharkovsky S. , Zoughi R , *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* , **10**(2017) , 26.
- [13] 卢慧 2017 硕士学位论文(郑州:郑州大学)。
- [14] 张伟 2016 电子制作 **20**(2016), 21.
- [15] Reinhold Ludwig and Pavel Bretschko,"RF Circuit Design Theory and Applications", USA: *Prentice Hall Inc* (2000), pp. 102.
- [16] 汪洪波,陈长琦,汪金新,真空, **47**(2010),49.
- [17] 黄启耀,姜翠宁,真空,**05**(2007), 76.
- [18] 李珏,激光杂志, **36**(2015), 21.
- [19] 宋慧娜 2007 硕士学位论文(郑州:郑州大学)。
- [20] 杨博,刘琰,胡治,计算机仿真, **35**(2018), 160.