

HT-7U 中心螺管模型线圈失超信号检测

钱静 陈灼民

(中国科学院等离子体物理研究所,合肥,230031)

摘要: 中心螺管是超导托卡马克装置磁体系统的重要组成部分,在 HT-7U 中,中心螺管采用管装超导电缆绕制,线圈以脉冲方式运行。文中介绍了 HT-7U 中心螺管模型线圈实验中,失超信号检测系统的工作原理及失超信号特点。当磁体以脉冲方式运行时,失超信号检测系统为装置提供可靠的失超保护动作信号;还给出了有关的实验数据和检测系统记录的失超信号变化曲线。

关键词: CICC导体 失超信号检测 平衡桥 同绕线

1 引言

HT-7U 托卡马克装置是一个全超导的大型核聚变研究实验装置。磁体系统主要由纵场 TF 超导线圈和极向场 PF 超导线圈组成。TF 和 PF 线圈均采用由 NbTi/Cu 复合线绞成的 CICC 导体绕制,用 4.5K 超临界氦迫流冷却。

CICC 型超导体是用多根超导复合线经多级绞缆而成。为了限定失超后热点温度不超过 150K,根据失超保护的要求,为了增加导体的铜超比,在第一级子缆中加进一定数量的纯铜线,经过多级绞缆挤压成形,最后封装在不锈钢导管中。严格来讲,CICC 导体是准低温稳定的。导体失超或者恢复是在几十毫秒量级时间内完成的,而氦在导体内股线间的空隙中流动,滞留时间可长达几分钟。因此在导体受到扰动时的瞬间不能有新的氦来补充,任何一个足够大的干扰能量输入到导体上都有可能使股线温度高于液氦温度,最后导致失超。

运行实践表明,超导磁体在稳定运行中,随时可能受到各种热扰动,从而引起失超。中心螺管线圈(属于极向场线圈系统)以脉冲方式运行,在 HT-7U 中中心螺管最大的运行电流 I_{op} 为 14.5kA;最高场强 B_{max} 达 4T;最大磁场变化率 dB/dt 为 $7T/s$,这对采用 NbTi 超导材料制做的导体将是一个大挑战。为了防止失超给磁体带来的危害,必须迅速准确地检测到失超信号,从而驱动专门的失超外保护装置动作^[1]。

2 失超信号检测电路原理

HT-7U 是一大型磁体系统,在额定工作条件下,磁体的储能巨大,其中 TF 系统的储能高达 300MJ,磁体的失超探测和保护显得尤其重要。要求失超探测和保护必须可靠,因此采用多重探测方案是必要的。在中心螺管失超探测方案中采用了以下两种方案:常规桥电路法和同绕线无感端电压信号法。以下分别讨论。

无阻是超导体在超导态的基本特性之一。承载电流的超导线圈当局部超导体转变成正常态后,这一部分导体存在电阻,出现电压,这是超导磁体失超的一级效应。探测出任何区域产生的正常态电阻性电压是失超保护的基本方法。对于稳态运行的磁体系统,通常运用平衡桥路法(如图 1 所示)检测失超信号。其中 U_d : 桥路输出电压(其即对应了磁体超导状态的失超信号), L_{m1} 、 L_{m2} 超导线圈绕阻, R_1 、 R_2 两个 $10k\Omega$ 可调电阻箱, e 点: 模型线圈中心抽头。

为了确保超导磁体线圈处于超导态时,桥电路保持平衡,即桥路输出电压 $U_d = 0$ 。当磁体进入超导态后,需在励磁过程中经过反复多次预调平衡。通过调整 R_1 、 R_2 阻值,使得无论欧姆电压或感应电压 $L di/dt$,在桥路上均为平衡态^[2]。仅当磁体部分区域发生失超时,电桥才有正比于正常态电阻性电压的不平衡信号 U_d 输出。假定在 L_{m1} 段出现正常态区域,有电阻 R_q 。实验中模型线圈的两部分电感值相同,令 $L_{m1} = L_{m2} = L$,互感为 M 。设

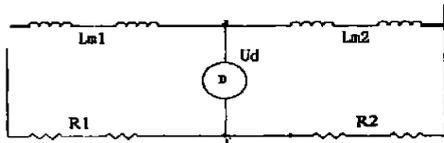


图 1 平衡桥电路

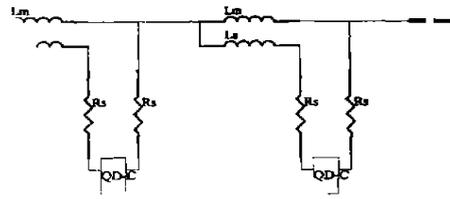


图 2 同绕线无感端电压信号检测电路

i_i 为通过磁体的电流。不考虑超导磁体接头电阻和电阻箱电感的影响,我们容易得出失超时桥路输出信号 $U_a = -0.5 \times R_q \times i_i^{[3]}$ 。

HT-7U 中心螺管线圈以脉冲方式运行,处于时变、非对称的横向磁场和平行磁场中;此外由于 HT-7U 大装置超导磁体尺寸大,液氦、液氮流量的瞬变以及线圈局部区域温度的瞬变,加剧了感应电压噪声, di/dt 引起的感应电压可与正常态电阻电压相比拟^[1]。传统的静态平衡桥(图 1 所示)无法有效地抵消感应电压噪声。

小的失超信号与很大的感应电压噪声并存,给失超探测带来很大困难。为了有效地抑制噪声电压,提高探测超导线圈正常态电阻的灵敏度,并考虑工艺上的可行性,我们在超导线圈绕阻的电缆外侧敷设同绕线 L_{s1} 、 L_{s2} ,同绕线的一端分别与绕阻的一端有电气连接(如图 2 所示)。其中 L_m 为主线圈(导体)电感, L_s 为同绕线圈

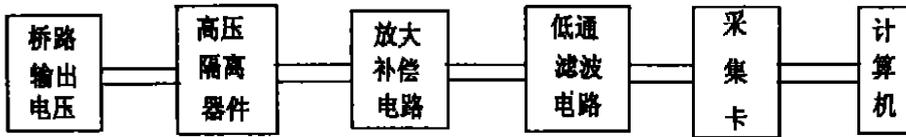


图 3 失超信号检测流程图

电感, R_s 为限流电阻, QD-C 为失超信号检测电路的下级电路(如图 3 所示)。该同绕线相当于与主超导磁体线圈 L_{m1} 、 L_{m2} 同尺寸和面积的次级感应元件^[4]。磁体运行时,同绕线上的感应电压信号与主超导线圈绕组上的感应电压信号基本相等,从而大大提高抵消感应电压的能力。其中 L_{s1} 、 L_{s2} 亦可称为与超导线圈绕组 L_{m1} 、 L_{m2} 同绕的感应电压探测线。在本次中心螺管模型线圈实验中,我们主要验证了采用此方法进行失超信号探测的可靠性。

3 失超信号检测系统流程图

实验表明,失超信号检测电路的输出信号为 mV 级微弱信号,而现场干扰如磁通跳跃、电源电压波动、感应电压等信号比较强。因此必须对失超信号检测电路的输出信号进行放大、双门限相与以及双信号同时处理、补偿以及低通滤波^[2]。此外,失超过电压有可能达数百伏甚至上千伏,电路中要有高压隔离器件,防止过电压窜入计算机系统。

下图给出本次 HT-7U 中心螺管模型线圈实验中的失超信号检测系统流程图,其中滤波电路截止频率为 1kHz,有效滤除了高频噪声。为实现装置技术诊断的自动化,采用计算机采集、存储、实时显示、高速处理失超信号检测电路的输出信号并及时发出警报。

为了适应 HT-7U 装置长时间高速数据采集的需要,我们采用基于 PCI 总线接口的数据采集卡 PCI9118HG,它具有 8 路 12bit 差分输入通道;增益可调,可实现微弱信号的软件放大,我们选用增益为 100;采样频率可达 330kHz,采集到的数据,足以反映失超前后瞬间超导磁体正常态区域电阻电压的发生、变化情况。

4 模型线圈失超检测实验曲线

本次实验中为了校验在脉冲工作方式下,中心螺管模型线圈内部存在电磁热以及机械噪声等干扰时失超检测系统的工作情况。励磁时通以匝电流 14.5 kA ,持续 1 s 后并试以 -20 kA/s 的下降速率快速下降 60 ms ,然后按 -10 kA/s 的下降速率快速下降 140 ms ,最后以 -5 kA/s 的下降速率下降到 -9 kA ,再以 3 kA/s 的上升速率至零。如此循环反复^[1]。

励磁过程中,为了检验所检测失超信号的可靠性,我们在层绕螺管线圈绕组的中心抽头附近装设加热丝,进行人工模拟失超实验。根据计算机采集并存储的数据,绘制出失超发生前后瞬间(约三分钟)的失超信号变化曲线。其中采用同绕线无感端电压信号法建立的失超信号检测电路取得的信号曲线,如图 4 所示。

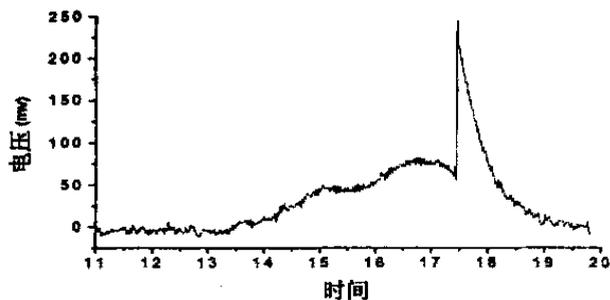


图 4 失超检测桥路输出信号

可见,一旦发生失超,该检测电路能够检测出很小的正常态电阻的存在。并且当失超产生的热量超过了超导磁体线圈自身的低温稳定能力,对应上图中的失超信号检测电路电压为 $U_d = 75\text{ mV}$ 时,失超信号检测系统正确报警。

失超发生时,正常区长度和超导线圈导体电阻增加速率很大;当检测电路输出电压超过阈值时,失超外保护装置动作,切断供电电源,并将释能电阻串入电路,从而形成释能回路。此后,正常区长度和导体电阻增加速率逐步减小,因此线圈内部过电压迅速上升到最大值后缓慢下降,相应的检测电路输出电压趋势也相同,这一点可从图 4 中观察到。由于检测电路中敷设了同绕线,有效抵消了感应电压的干扰,因此图 4 中的曲线较为平滑,其发展趋势与理论计算完全一致,并且真实反映了失超状况。

5 结论与展望

在 HT-7U 中心螺管模型线圈实验中,每一次失超检测系统均准确、及时报告了失超发生的情况,保障了失超外保护装置的及时准确动作。实验表明在以脉冲方式运行的磁体中,在超导线圈外侧敷设同绕线是行之有效的失超信号检测方法,整个失超信号检测系统是可靠的,为将来 HT-7U 大装置上超导线圈系统的失超信号检测方案的设计以及实际运行积累了经验,提供了佐证。

参 考 文 献

- [1] 陈灼民,潘引年等. HT-7U 装置主机设计文集(二)(四), 1999
- [2] 刘彦琴,胡彦兰等. HT-7U 托卡马克装置纵场超导磁体失超保护可靠性研究. 低温与超导, 2001; 29(1)
- [3] 易昌练,王燕菊等. 超导磁体保护装置的研制经验, 低温物理, 1981, 3(4)
- [4] Michael R Chaplin, Nicoial N Martovetsky, Jon P Zbasnik, Co - Wound Voltage Sensor R&D for TPX Magnets, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. 94550

(下转第 19 页后)

参 考 文 献

- [1] Swift G W, Thermoacoustic engines. J. Acoustic Soc. Am, 1988, 84(4): 1145~ 1180
- [2] Backhaus S, Swift G W, A thermoacoustic- Stirling heat engine Detailed study. J. Acoustic Soc. Am, 2000, 107(6): 3148 ~ 3166
- [3] Backhaus S, Swift G W, A thermoacoustic- Stirling heat engine. Nature, 1999, 399 335~ 338
- [4] 罗志昌. 流体网络理论. 第一版, 北京, 机械工业出版社, 1988
- [5] Bill Ward, Greg Swift, Design Environment for Low- Amplitude Thermoacoustic Engines Version 4. 6 Tutorial and User's Guide, Los Alamos National Laboratory, 1998

Optimization Design for a Travelling Wave Thermoacoustic Engine

Yang Mei¹, Luo Ercang², Ling Hong², Li Xiaoming¹, Chen Guobang¹, Wu Jianfeng²

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

(2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Abstract In this paper, we proposed an optimization model for designing an efficient travelling- wave thermoacoustic engine. Both of the viscous friction and the axial heat conduction are included in this model. The analysis presented the optimal regenerator structure parameters of the traveling- wave thermoacoustic prime mover. The conclusions obtained here may provide some theoretical guidance for the optimal design of the thermoacoustic devices.

Keywords Travelling wave, Thermoacoustic engine, Optimization design

作者简介: 杨梅,女,硕士研究生. 主要从事热声热机的理论分析和实验研究.

(上接第 12页后)

Detection of Quench on the HT- 7U Superconducting Tokamak Model Coil

Qian Jing, Chen Zhuomin

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031)

Abstract Center solenoid(CS) is an important part of HT- 7U Tokamak magnet system. CS coil is wound by CICC and runs by mode of impulse. The article introduces the principle of the quench detection system and the characters of the quench signal in the HT- 7U CS model coil experiment. The quench detection system can provide reliable quench protection trigger signals for HT- 7U. The article also gives the related experimental data and the quench curve recorded by the detection system.

Keywords CICC conductor, Detection of quench, Bridge circuit device, Co- wound coil

作者简介: 钱静,女,1975年生. 现为中国科学院等离子体物理研究所硕士研究生. 主要从事低温、强磁场以及高电压环境下电气信号的检测、采集与信息分析处理.