

文章编号: 1007-4627(2011)01-0058-05

基于 FPGA 的 Super-FRS 超导二极磁铁样机失超探测系统*

杨通军^{1,2}, 袁平^{1, #}, 吴巍^{1,2}, 何源¹, 韩少斐¹, 姚庆高^{1,2}, 马力祯¹

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 介绍了 FAIR 项目 Super-FRS 超导二极磁铁样机的基于 FPGA 的失超探测系统。该失超探测系统采用平衡桥路法, 并通过两组独立桥路以消除失超探测死区。通过 NI PXI-7830R FPGA 模块实现平滑滤波和失超判断算法, 并给出失超触发信号。失超数据采集模块采用预采样技术, 将失超前后一段时间内的数据采集下来, 以便进行后续分析。通过测试, 失超探测模块准确检测到了失超的发生, 并触发失超保护电路和失超数据采集模块工作, 有效地保护了超导二极磁铁。

关键词: 失超探测; FPGA; 数据采集; 失超保护

中图分类号: TL503.8 **文献标识码:** A

1 引言

反质子与离子研究装置 (Facility for Antiproton and Ion Research, 简称 FAIR) 是由德国重离子研究中心 (GSI) 负责承建的大型国际合作项目, 由包括中国在内的十几个国家联合建造。中国合作组 (中国科学院近代物理研究所、中国科学院电工

研究所、中国科学院等离子体物理研究所) 负责超级碎片分离器 (Super-FRS) 超导二极磁铁样机的研制。目前 Super-FRS 超导二极磁铁样机已完成加工和测试^[1-3]。该磁铁采用低温超导线圈、温铁、温孔结构, 磁铁的主要参数^[4]如表 1 所示。该磁铁的储能为 0.5 MJ, 如此大的储能如果在磁体失超时得不到及时释放, 可能会造成磁铁的损坏。为了保证超导磁铁安全, 失超探测系统必须能够快速准确地探测到磁铁失超的发生, 从而及时地触发失超保护电路, 把能量迅速转移到卸能电阻上。本文介绍了该超导二极磁铁样机的失超探测系统。

2 失超探测方法

超导磁铁失超 (由超导态转变为常导态) 后, 线圈上的电压、电流会发生变化, 同时, 由于欧姆热的原因, 使液氦大量气化, 因此整个冷却回路中液氦的压强以及流量也会发生变化。这些信号都可以作为失超探测信号, 相应的有多种失超探测方法。

最常用失超探测方法是电压抽头法。其原理是: 当超导磁铁发生失超后, 正常区电阻会在线圈中产生阻压, 通过检测阻压可以判断出失超的发

表 1 Super-FRS 超导二极磁铁样机主要参数

参数	数值
导体尺寸/mm×mm	1.17×1.93
带绝缘的导体尺寸/mm×mm	1.43×2.24
铜超比	11
n 值	100
超导丝平均直径/ μm	66
超导丝数量	55
$I_c(1.6\text{ T}, 4.2\text{ K})/\text{A}$	813
$I_c(2\text{ T}, 4.2\text{ K})/\text{A}$	774
电感/H	23
中心磁场/T	1.6
电流/A	240
储能/MJ	0.5

* 收稿日期: 2010-03-12; 修改日期: 2010-03-30

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2008CB817701)

作者简介: 杨通军(1984—), 男(汉族), 贵州松桃人, 硕士研究生, 从事超导磁体失超保护和测量研究;

E-mail: yangtj@impcas.ac.cn

通讯联系人: 袁平, E-mail: yuamp@impcas.ac.cn

生。当电流恒定时, 通过线圈端电压可以判断是否失超。但当电流变化时, 线圈端电压会叠加上由于电流变化引起的感应电压, 为了准确判断失超, 必须设法消除这部分电压。通常有两种方法可以消除感生电压。

第一种是平衡桥路法: 从线圈引出 3 个电压抽头, 与外接电阻组成平衡桥, 如图 1 所示, 中间抽头把线圈分成两部分 L_1 和 L_2 , R_q 为失超时的线圈上的电阻(未失超时为 0), R_1 和 R_2 为可调节的平衡电阻。在线圈正式加电之前, 应先加载一定上升速率的小电流(在此情况下线圈不会失超), 调节平衡电阻使桥路输出电压 V_b 为 0, 此时电桥平衡, 即满足

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

当失超发生时, R_q 不等于 0, R_q 上压降为 V_q 。通过计算可得桥路输出电压为

$$V_b = \frac{L_2}{L_1 + L_2} V_q \quad (2)$$

此时, V_b 不等于 0, 电桥不再平衡。因此可以通过 V_b 值判断磁体是否发生失超。问题是: 当失超发生中间抽头处时, 正常区以相同的速度向两端扩展, 线圈的两部分阻压相互抵消, 检测不到失超的发生, 即存在失超探测死区。采用两个具有不同中间抽头的探测桥路^[5], 当失超发生在一个桥的中间抽头处时, 另一个桥路可以检测失超的发生, 这样可以避免失超探测死区, 提高探测系统的可靠性。

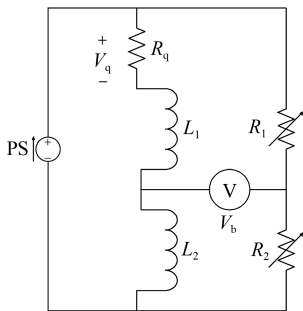


图 1 桥路法失超探测电路

第二种方法是检测电流信号, 通过对电流求导得到电流变化率, 再乘以线圈电感得出感应电压, 利用端电压减去线圈感应电压, 即可得到线圈正常区阻压 V_q , 即

$$V_q = V - L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

其中, V 为线圈端电压, L 为电感, I 为电流。因此可以通过 V_q 的值来判断磁体是否失超。

在包含铁芯的超导磁体中, 线圈电感会随电流变化而变化, 要得到电感随电流变化曲线比较困难, 如果采用这种探测方法会比桥路法复杂很多。由于 Super-FRS 超导二极磁铁样机包含铁芯, 且由上下两个线圈组成, 采用桥路法实现失超探测比较简单可靠, 所以本系统采用桥路法进行失超探测。

3 Super-FRS 超导二极磁铁样机失超探测系统

Super-FRS 超导二极磁铁样机失超探测系统包括以下部分: 桥式电路、隔离放大器、失超判断模块及失超数据采集模块。失超判断模块给出失超触发信号, 并触发失超保护电路, 将线圈能量转移到卸能电阻上, 同时触发失超数据采集模块采集失超前后数据。

本失超探测系统在 NI LabVIEW 平台上开发实现。硬件配置为: 失超判断模块采用可配置输入输出 FPGA 模块 NI PXI-7830R, 失超数据采集模块采用 NI PXI-6133, 控制器为 NI PXI-8108, 机箱为 NI PXI-1042Q。

3.1 失超探测模块

由于磁铁储能大, 失超探测电路必须快速准确地探测失超的发生, 及时触发失超保护电路, 接入卸能电阻和关断电源以免造成磁铁损坏。本系统采用不同中间抽头的两组独立桥路进行失超探测。失超探测的电压抽头如图 2 所示, 抽头 5 和 6 为不同的两个中间抽头, 两组桥路抽头分别为 4, 5, 7 和 4, 6, 7。

由于线圈上会产生很高的共模电压^[6], 于是采用了隔离放大器模块 (ADVANTECH ADAM-3014, 1000 V_{DC} 隔离) 以保护后端数据采集卡, 同时也可以去除共模干扰。

失超判断模块 NI PXI-7830R 是一块可配置输入输出的 FPGA 模块。具有 4 通道模拟输入、输出 (16 位分辨率, ± 10 V 量程), 56 通道数字输入、输出, 模拟输入最高采样率为 200 kSa/s。失超判断算法利用 FPGA 实现, 可独立于控制器和操作系统

运行, 具有极高的实时性和可靠性, 不会因为操作系统的故障而使系统瘫痪^[7]。

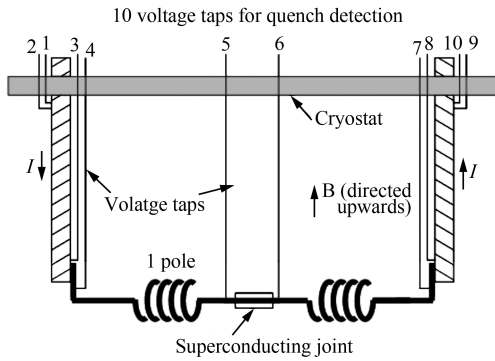


图 2 失超探测电压抽头

失超信号经过隔离模块, 通过失超判断模块的 AD 转换电路得到数字信号, 然后通过 FPGA 根据失超判断算法判断磁体是否失超。通过数字 I/O 端锁存失超触发信号并触发失超保护电路和失超数据采集模块工作。其中 AD 转换采样率设置为 2 kSa/s。失超触发信号定义为低电平表示失超, 这样可以防止信号线断开或 PXI 机箱掉电引发事故^[7]。

由于工作环境具有很强的电磁干扰, 因此在进行判断之前对失超信号进行了平滑滤波以提高系统的抗干扰能力。平滑滤波在 FPGA 模块上实现, 通过在一个工频周期内求平均值实现信号的平滑处理, 从而可以有效滤除工频干扰。

由于失超信号是单向增大的, 故采用以下失超判断逻辑(如图 3 所示): 如果桥路电压输出信号连续 n 次大于阈值电压 V_{th} , 并且信号逐次增大, 则认为失超。其中每两次之间的延时为 t_d , 则总的延时为 $t = (n-1)t_d$ 。减小阈值电压和延时有利于提高失超检测的灵敏度, 快速检测失超发生, 但容易受干扰信号的影响, 产生误判。因此需要根据失超计算在保证磁体安全的前提下选取较大的阈值和较长延时。在本系统中, n, t_d, V_{th} 分别为 4, 5 ms, 0.2 V。

为了验证失超探测系统的可靠性, 我们对其进行了测试。通过信号发生器产生两路信号模拟两组桥路信号。失超判断模块采集这两路信号并对其进行失超判断。利用数据采集卡采集到的失超测试信号和失超触发信号如图 4 所示。图中, V_{b1} 和 V_{b2} 为测试信号, V_{b1} 是幅值为 0.5 V、频率为 5 Hz 的正弦信号, V_{b2} 的幅值为 0。将失超触发信号从高水平

变为低电平作为 $t=0$ 时刻, 在触发前 15 ms 即 $t = -0.015$ s 时刻 V_{b1} 的值达到 0.205915 V。可以看出, V_{b1} 从大于阈值电压(0.2 V)开始到失超触发的延时与设定的 15 ms 基本相符。

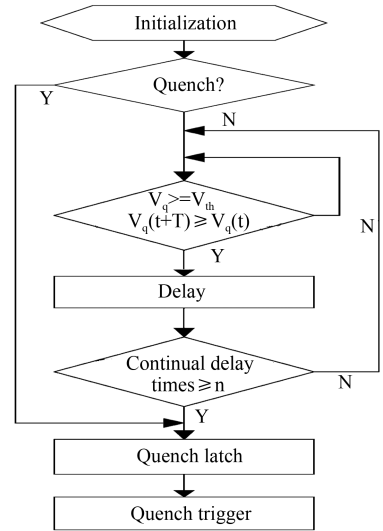


图 3 失超判断逻辑

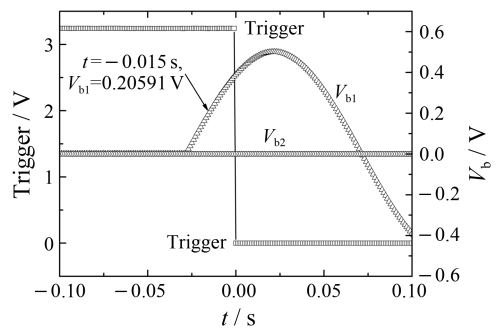


图 4 失超探测系统测试结果

3.2 失超数据采集模块

失超发生后, 失超触发信号同时触发失超数据采集模块进行失超数据采集, 以便对后续的采集失超数据进行失超分析。采集的失超数据主要包括桥路信号、线圈电流和线圈端电压。

失超信号、线圈电流通过 NI PXI-6133(14 位分辨率)同步采集卡实现。失超触发信号由 PXI 机箱背板产生。采样率设置为 1 kSa/s, 总采样时间 50 s, 预采样时间为 10 s。通过预采样技术, 还可以将触发前后一段时间的信号记录下来。根据预先设置好的总采样点和预采样点数, 数据采集卡持续采集数据, 当达到预采样点数后, 新采集的数据将覆盖最前面的数据。一旦发生失超, 采集卡接收到

PXI 背板触发后, 采集卡继续采集数据, 但后面采集的数据将不再覆盖前面的数据, 达到总的采样点后停止采集, 然后保存数据。

当失超发生时, 卸能电阻被接入, 线圈两端会产生高压, 之后衰减为零。最大电压^[5] V_m 为

$$V_m = IR_d, \quad (4)$$

其中, I 为运行电流, R_d 为卸能电阻(本保护电路中设置为 1.757Ω), 其大小由线圈能承受的最高电压决定。我们利用失超判断模块 NI PXI-7830R 数字端口触发泰克 DPO3014 示波器(探头为 P5205 高压差分探头)对线圈失超时的端电压进行采集。图 5 给出了在电流为 240 A 稳态运行时强制接入卸能电阻后线圈端电压的变化过程, 在接入时刻电压达到了 430 V, 然后按指数衰减为零。

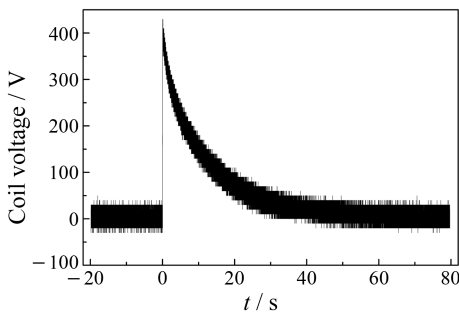


图 5 线圈端电压的变化

4 测试

Super-FRS 超导二极磁铁样机已经通过测试。磁铁工作电流 240 A 稳定运行 2 h 后失超, 失超探测模块准确探测到了失超的发生, 图 6 给出了失超数据采集模块采集到的一路桥路电压和电流变化过程。从图中可以看到, 在 $t=0$ 时刻, 失超探测模块触发失超保护电路工作, 接入卸能电阻, 从而电流迅速下降为零。失超触发信号同时触发失超数据采集模块进行失超数据的采集, 图 6 中的桥路信号 V_b 在大于 5 V 后被隔离放大器截止掉了。隔离放大器具有 1000 V 直流隔离, 可以保护后端数据采集卡免遭高压损坏。由于采集时间设置不够, 导致一部分失超数据没有采集完全, 可以设置更长的采样时间以获取完整的失超数据。图 7 显示了磁体失超过程中两组桥路信号的变化过程。从图中可看出, 两组桥路信号相差很小。失超信号触发前 15 ms 时

刻, 桥路电压 $V_{b1} = 0.21301 \text{ V}$, $V_{b2} = 0.21179 \text{ V}$, 与设置的 0.2 V 的阈值电压基本相符。

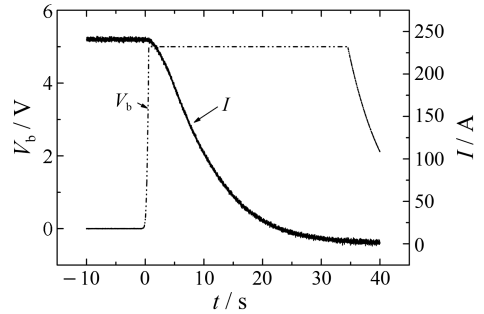


图 6 失超前后桥路电压和电流

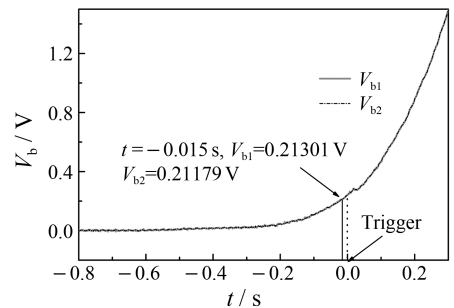


图 7 失超时桥路电压变化过程

5 结论

Super-FRS 超导二极磁铁样机失超探测系统采用桥路法, 并通过 NI 可配置输入输出 FPGA 模块 (NI PXI 7830R) 实现了对失超信号的处理和失超判断的算法。由于 FPGA 独立于操作系统运行, 因此该系统具有较高的可靠性和实时性。通过测试, 该系统准确地检测到了失超的发生并及时触发保护电路转移磁铁能量, 有效地保护了磁铁, 同时也触发了失超数据采集模块进行失超数据的采集, 为进行进一步的离线失超分析提供了数据来源。

参考文献 (References):

- [1] Yao Q G, Ma L Z, Zhang X Q, *et al.* IEEE Transationson, 2010, 20(3): 172.
- [2] Bian Wenlong, Yuan Ping, Ma Lizhen, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007, 24(4): 280(in Chinese).
(卞文龙, 袁平, 马力祯, 等. 原子核物理评论, 2007, 24(4): 280.)
- [3] Yao Qinggao, Ma Lizhen, Zhang Xiaohui, *et al.* Nuclear Physics Review, 2010, 27(4): 440(in Chinese).

- (姚庆高, 马力祯, 张小奇, 等. 原子核物理评论, 2010, **27** (4): 440.)
- [4] Zhu Yinfeng, Wu Weiyue, Wu Songtao, *et al.* Nuclear Fusion and Plasma Physics. 2008, **28**(2): 163(in Chinese). (朱银锋, 吴维越, 武松涛, 等. 核聚变与等离子体物理, 2008, **28**(2): 163.)
- [5] Wilson Martin N. Superconducting Magnets. New York: Oxford University Press, 1983, 219—221.
- [6] Dietrich Birus, Thomas Rummela, Marko Fricke, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2007, **82**: 1400.
- [7] Carcagno R H, Feher S, Lamm M, *et al.* An FPGA-based Quench Detection and Protection System for Superconducting Accelerator Magnet//Swapan Chattopadhyay. Particle Accelerator Conference. Knoxville, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory Spallation Neutron Source and Thomas Jefferson National Accelerator Facility, 2005, 3502—3504.

FPGA-based Quench Detection System for Super-FRS Super-ferric Dipole Prototype^{*}

YANG Tong-jun^{1, 2}, YUAN Ping^{1, #}, WU Wei^{1, 2}, HE Yuan¹, HAN Shao-fei¹, YAO Qing-gao^{1, 2}, MA Li-zhen¹

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The quench detection system for Super-FRS super-ferric dipole prototype magnet of FAIR has been designed and built. The balance bridge was used to detect quench signal. In order to avoid blind zone of quench detection, two independent bridges were used. NI PXI-7830R FPGA was used to implement filter to quench signal and algorithm of quench decision and to produce quench trigger signal. Pre-sample technique was used in quench data acquisition. The data before and after quench could be recorded for analysis later. The test result indicated that the quench of the dipole's superconducting coil could be reliably detected by the quench detection module.

Key words: quench detection; FPGA; data acquisition; quench protection

* Received date: 12 Mar. 2010; Revised date: 30 Mar. 2010

* Foundation item: Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2008CB817701)

Corresponding author: Yuan Ping, E-mail: yuanp@impcas.ac.cn