

超导磁共振主磁体励磁测控系统设计与开发

余相泉, 朱建明

(中国计量大学 信息工程学院 生物医学工程研究所, 杭州 310018)

摘要: 医用超导磁共振主磁体在励磁过程中出现的交流损耗和传导漏热等情况, 是超导磁体失超的根本原因; 为了控制和保证励磁过程的稳定性、可靠性和安全性, 开发和完善励磁的测控系统就显得格外重要; 设计并开发了基于 LabVIEW 平台的超导磁共振主磁体励磁测控系统; 系统数据通过在虚拟仪器平台上调用动态链接库文件 (DLL), 控制泰克公司 KE2700 系列集成式采集卡采集得到; 传感器选择根据相应功能需要配置; 操作台仪器控制、数据采集程序和人机界面由 LabVIEW 编写; 搭配保护电路, 保护超导线圈, 降低失超损失; 实现数据采集、参数控制、失超保护、匀场测试等功能。系统满足设计开发目的, 平台搭建稳定可靠; 功能相对完善, 具体操作简单, 交互界面友好, 后期修改和功能扩展灵活; 经工程实际运行测试验证, 提高了研究和工作效率, 达到设计要求, 有实际应用价值。

关键词: 励磁系统; 数据采集; LabVIEW; 动态链接库; 失超保护

Design and Development of a Magnetic Field Ramping Control and Measurement System for Superconducting MRI

Yu Xiangquan, Zhu Jianming

(Department of Biomedical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: AC loss and conduction heat leakage are the main cause of magnetic quench during magnetic field ramping for superconducting MRI systems. In order to maintain the stability and safety of field ramping process, it is important to have a well-designed field ramping control and measurement system. In this study, a field ramping control and measurement system was designed and developed using the LabVIEW platform. System data were acquired through using dynamic linked library, DLL-controlled Tektronix KE2700 system. The selection of transducers was based on required system functionality and specification. System control platform, data acquisition program and user interface (UI) was developed on workstation using LabVIEW with easy modification of acquisition parameters through UI. Quench protection resistance can protect the superconducting coil from loss of energy, and loss of superconductivity. System met the design requirement, and the established platform was stable and reliable, with relatively complete functionality. System is easy to operate, with user-friendly interface, and easy for future expansion and debugging. After detailed engineering test and practice, it was shown that the system design and application requirement can be met, and system design goals were achieved. With its improved efficiency, this study has great value in actual application for superconducting magnets.

Keywords: magnet field ramping system; data acquisition; LabVIEW; DLL—dynamic linked library; superconducting loss protection

0 引言

近几十年来, 超导磁体凭借其无损耗的独特性和优越性使超导技术得到快速的发展和广泛的推广^[1]。在我国矿产资源日渐匮乏的情况下, 超导设备磁体凭借其高磁场强度、高图像信噪比和将近 95% 的高能量返回率^[2]等一系列优点, 超越永磁型磁体成为医用磁共振成像磁体的主流。超导磁共振结构复杂, 超导线圈对液氦浸泡的低温环境要求特殊。在外加电源供电励磁的过程中, 外界一系列的特殊情况会导致磁体线圈温度超过超导临界温度, 失超情况随之而来。在目前工程实际中, 超导磁体励磁过程的稳定性和安全性问题依然突出。因此, 设计超导磁共振主磁体励磁测控系统就有一定的实际应用价值。

针对测试数据的准确性、实时性和超导磁体的复杂性, 系统多通道监测实时数据、保护电路控制磁体失超。

本文采用 NI 公司的图形化编程语言 LabVIEW 作为开发平台, 设计数据采集与测量控制程序。LabVIEW 软件凭借各式各样的图形化功能函数、高效的编程方式、前面板和程序框图的“双显示”及应用、安装程序等, 在数据采集和仪器控制方面有其独特的优势, 能有效实现采集数据的分析、处理和显示, 满足功能设计需求^[3]。

DLL 是动态链接库文件, 在 Windows 环境下, 通过程序共享实现对特定函数和代码的加载, 执行相应任务。DLL 的使用可以轻松实现程序的模块化, 彼此相互独立; 并且通过调用相关函数以便内存的高效利用, 加载速度快。

1 系统组成及工作原理

磁共振成像系统是现代医疗的一类检查与诊断设备, 其利用氢原子核在高磁场下受射频脉冲影响产生的共振现象形成图像。超导型磁共振设备复杂度高于永磁型设备, 其复杂的制冷系统和特殊的多层绝热真空结构均是永磁型不具备

收稿日期: 2016-11-21; 修回日期: 2017-01-05。

作者简介: 余相泉 (1994-), 男, 浙江省衢州市人, 硕士研究生, 主要从事磁共振系统测试、图像重建方向的研究。

通讯作者: 朱建明 (1963-), 男, 教授, 硕士, 博士研究生导师, 主要从事磁共振系统及医学物理方向的研究。

的,其中制冷系统包括冷头、压缩机和水冷机组三部分,用于建立并维持 4.2 K 超导环境。在实际应用中,由于结构限制和传导漏热等多种因素,液氮吸收热量导致低温环境破坏,会引起失超。

本文针对超导型磁共振设备的特殊性,以 1.5 T 圆筒型超导磁共振为例,设计与开发超导励磁测控系统,主要包括:测量模块、仪器控制、保护电路和操作台等,系统组成如图 1 所示。测量模块部分主要由各种传感器、数据采集卡和驱动程序组成,通过相应的采集数据,实时监测液氮容器壁待测位置温度、磁体圆筒内部磁场强度和液氮高度位置信息;仪器控制程序设计于 LabVIEW 平台,数据流内容由测试模块采集的数据经过设计的公式程序计算而来,通过程序框图和前面板实现数据采集类型、参数的实时控制和数据波形界面显示;失超保护部分由超导开关和保护电阻组成,超导开关在加热系统工作下会产生电阻变化,由于超导开关电阻大小的变化,保护电路分别形成由外加电源和超导线圈组成的充磁回路、由超导开关和超导线圈组成的超导回路,其中超导线圈吸收能量保证励磁过程稳定,而在超导线圈失超情况下,保护电阻吸收能量,升温散热以保证超导线圈安全,降低损失。

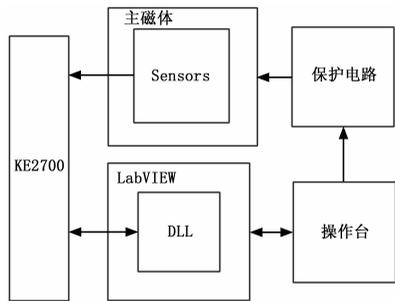


图 1 系统组成框图

数据采集卡为泰克公司的 KE2700 系列,其适用于电阻、电流、电压测量等一系列的工程实际应用,操作人员可以在 LabVIEW 平台上利用设计开发的系统 DLL 文件轻松的实现仪器控制与工程测量。针对非常规的多点低温测量,利用其 20 通道多路复用器差分模块和各种 RTD 内置算法,轻松创建低温测试系统,实现多通道数据实时监视,无需中断便可快速查看通道数据,搭配应急保护算法,智能判断数据准确性和正确性并可以通过 LabVIEW 错误簇迅速、精准的反馈给开发和操作人员。

2 系统硬件构成

2.1 低温测量

超导磁共振依靠独特的制冷系统维持超导环境,其中液氮循环结构如图 2 所示,低温测量硬件组成为:

1) 分别安装 2 支 Cernox™ 电阻传感器于制冷机一级和二级冷头(图 2 中①和③)两个位置。由于连接液氮容器,冷头温度应接近液氮温度 4.2 K。Cernox™ 最低温度限制为 100 mK,全量程温度范围内灵敏度良好;4.2 K 环境下的热响应时间仅为 1.5 毫秒,反应快速;较低的磁阻抗适应高磁场环境,测量误差小;封装形式稳固,适用于该处特殊的温度测量环境。开发人员采集电阻数据,根据对应传感器公式计算温度信息。

2) 分别安装 4 支铂电阻温度计 PT100 于冷头连接处、颈管连接处、50 K 冷屏和孔管(图 2 中②④⑤⑥)四个位置,必要时可以配上加热设备,用以维持限定温度。铂电阻在标准测量范围内阻值的温度曲线符合标准工业变化曲线,可被用于 14 K 环境下,价格便宜,安装简单,适合此处高测量重复率的温度测量。开发人员采集电阻数据,根据对于传感器公式计算温度信息。

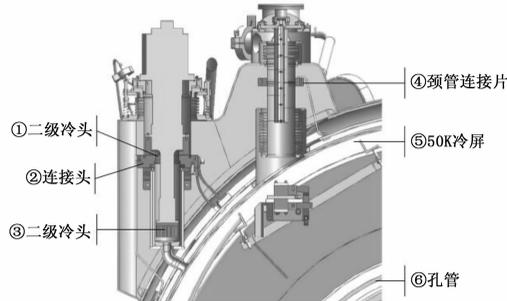


图 2 超导磁体液氮循环结构示意图

3) 分别安装 3 支 TMI-CCS 碳电阻于主磁体液氮容器壁的上中下三段。液氮并不会充满液氮容器,往往最上端的碳电阻并不会浸泡在液氮之中。碳电阻受磁场、压力等外界因素影响小,由石墨颗粒制成,放置于磁体内部,适用于此处液氮温区的温度测量。碳电阻有着较高的灵敏度,并且由于尺寸小,安装便利,适合前期实验测试和固定密封状况下使用。

传感器、温度计、碳电阻测量连接方式为最简单的两线制,为消除测试引线的电压下跌和接触电阻等影响因素而导致的测量误差,测试电路需在工作温度范围内进行二次校准,提前测得外界影响电阻 R_1 ,因此传感器电阻值 R_0 为:

$$R_0 = R - R_1 \quad (1)$$

其中: R 为 2700 采集卡获取的电阻信号数据。根据测试所得电阻值计算温度数据,其中碳电阻电阻温度曲线参数公式为:

$$T(R) = K_1 + K_2 \left(\frac{1000}{R} \right)^5 + K_3 \left(\frac{1000}{R} \right)^6 \quad (2)$$

其中: R 为碳电阻阻值, $T(R)$ 为碳电阻温度, K_1 、 K_2 、 K_3 为碳电阻系数,以碳电阻为例,根据其 M010003 型号碳电阻系数文本文件标定,其值分别为 3.742、258.701 和 -43.425,具有负的电阻系数,且曲线光滑。

2.2 磁性测量

超导线圈由超导线经过特殊的方式绕制而成,并通上电流产生磁场,一般以中心一定区域范围内磁场强度达到要求并误差控制在合理范围内为合格标准。

安装一只 HGCA-3020 低温轴向霍尔传感器于自主设计的测试架上,置于圆筒中心位置,并配上 LakeShore425 高斯计,必要时可以搭配手持式便携高斯计。

高斯计测量量程为 150 mG 至 250 kG,励磁过程中,利用校零过后的探头,采用直流测量模式,测试中心磁场。如中心磁场达到设计要求,利用霍尔传感器测试中心具体位置场强和均匀区域。

HGCA-3020 霍尔传感器采用酚醛树脂封装,最低工作环境为 1.5 K,4 K 时磁场灵敏度变化参数仅为 -0.7%;测试

空间为半径 250 mm 的球形面, 共 12 条测试线, 每条测试线包含 22 个测试点, 共 242 个测试点; 测试架传感器固定点可以螺旋转动, 各个测试点随着固定点的移动逐一测试; 仅采用一只霍尔传感器是为控制相对误差, 并利用测试点数据绝对信息计算磁场均匀性, 一般均匀磁场不均匀度不超过 10 ppm。

2.3 液氦液位监测

安装液氦液位监测设备于液氦容器内。其由超导导线制成, 利用液氦液面高低导致淹没部位多少, 而产生的电阻变化测得液氦液位信息, 其有效长度为 600 mm。利用四线测量连接方式测电阻, 一端接电源通电流, 另一端测电压。通过转换和计算, 在操作台界面显示液氦液位百分比信息。

3 软件部分

3.1 软件结构设计

LabVIEW 作为一种图形化编程语言, 其程序运行方式为线程模式, 利用高亮执行可以直观查看程序运行进度及数据的走向。通过创建功能子 VI 规范化程序框图, 并清晰化系统框图作为仪器控制与通信、数据采集与处理、数据显示与储存这 3 个主要的模块。

仪器控制与通信模块通过在程序框图中调用动态链接库文件实现操作台对采集设备的控制; 通过串口通信实现操作台与采集设备的通信。数据采集与处理模块通过多线程的并行程序框图同步采集包括不同参数的多种监测数据, 放置于循环中判断人机界面参数变化以提高程序效率; 每一种测量数据创建了用于缓存数据的相应队列, 利用队列状态机的多生产者-多消费者构架 (DEMO) 实现生产者事件结构读入、消费者事件结构读出; 根据采集到的原始数据和相应的计算公式, 设计数据转换子 vi, 计算出目标数据。数据显示与储存模块通过将 Waveform Chart 函数放置于循环结构中, 完成实时显示; 前面板具有人性化的交互界面, 包含三端温度显示图、液氦液位信息图、冷头温度仪表盘图、报警指示灯及一些参数控制框; 利用 Open/Create/Replace File.vi 和 Write to Text File Function.vi 创建和写入数据文本文件, 以便操作人员查看和保存数据; 系统通过 LabVIEW 平台提供的数据库连接工具包 (Database Connectivity Toolkit) 连接本地或远程数据库。

3.2 数据通信

虚拟仪器软件结构 (virtual instrument software architecture, VISA) 是 LabVIEW 平台上用于控制仪器 I/O 的应用编程接口^[4], 可实现仪器与操作台包括 COM、GPIB、USB 在内的多种接口的通信, 无需详细了解复杂的通信协议, 便可在程序框图之上轻松实现相应驱动程序的设计。

本系统操作台通过 COM 串口与满足 RS232 协议的 KE2700 实现数据通讯, 调用“VISA Configure Serial Port VI”、“VISA Write Function”、“VISA Read Function”等 VISA 函数库中的子 VI 对接口进行初始化配置、写入控制指令、读出返回数据, 其中波特率 9600bps、数据位 8 bits。

3.3 仪器配置与测试

在 LabVIEW 平台上对 KE2700 进行系统配置以完成数据采集任务。如图 3 所示, 测试连接方式为两线, 利用设计的子 vi 搭建数据采集程序框图, 通过调用“KE2700 初始化”、“KE2700 通道设置”、“KE2700 测量配置”、“KE2700 触发启

动”、“KE2700 启动”、“KE2700 多点读取”及一些串口函数, 选择数据通道为 212、213、214 三个, 选择测量功能为 2-Wire Resistance, 选择数据最大范围为 10000, 选择触发源为 Immediate, 选择触发个数和采样个数分别为 1 和 3, 控制 KE2700 仪器参数及采集方式以满足设计要求, 并置 KE2700 Read Multi-Point.vi 于循环结构之中, 设置采样循环时间, 不断读取串口传来的采集数据, 最后保存至文本文件, 完成测试任务。

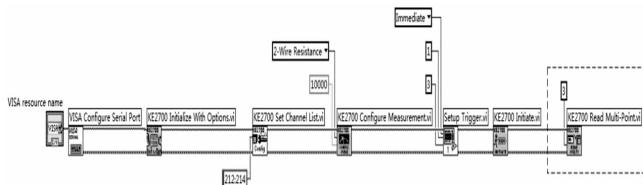


图 3 KE2700 初始化配置简要示意图

3.4 动态链接库

配置 LabVIEW 平台的 Call Library Function 节点以完成对开发的 DLL 库函数的调用, 通过“Configure...”打开配置属性对话框, 选择链接库位置路径及文件名、链接库功能函数、功能函数输入输出数据变量名及类型等。

如图 4 所示为 KE2700 系列采集卡初始化函数内部程序框图, 利用配置节点完成创建函数图形化输入输出类型及相关操作, 并在保证程序安全的情况下, 选择以满足多线程的“run in any Thread”方式调用链接库函数“KE2700 InitWithOptions”。

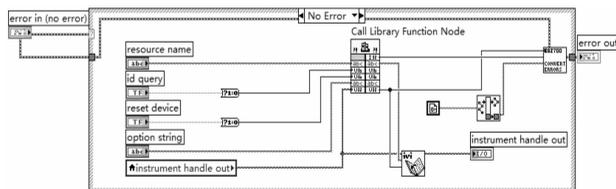


图 4 KE2700 初始化函数内部程序框图

4 失超保护

磁体失超即线圈由超导体变成常导体, 往往伴随着环境温度变化, 并对超导线圈产生一定程度的破坏。因此, 系统通过采集的实时温度数据监测系统状态, 并建立失超保护机制, 降低失超可能性和损失成本。失超保护系统组成框图和电路简要示意图如图 5~6 所示。

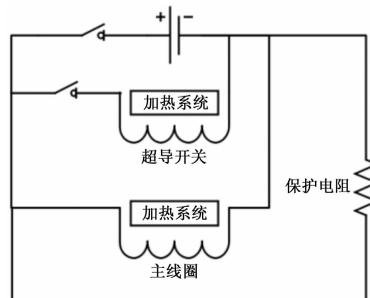


图 5 失超保护系统组成框图

层协议。

5 结束语

本文论述了机载高速航电总线的数据采集及实时遥测技术, 设计了相应的试飞测试系统, 解决了传统测试方案无法满足机载高速航电总线数据采集技术的难题。该套机载高速航电总线试飞测试系统已成功应用于飞行试验中, 完成了全新总线架构下海量实时数据的采集、记录以及实时遥测传输的问题。该方案的成功应用, 为今后相关测试研究提供了重要的参考价值。

参考文献:

[1] 张杰. 机载高速数据总线技术的应用研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (6): 163-166

[2] 张英静, 熊华钢, 刘志丹. 可用于航空电子系统的时间触发以太网 [J]. 电光与控制, 2015, 22 (5): 49-53.

[3] 曲芳, 王剑, 孙国强. 高速数据总线测试概述 [J]. 计算机与数字工程, 2010, 38 (9): 101-104

[4] 田泽, 徐文龙, 许恒, 等. FC 光纤通道技术研究综述 [J]. 电子技术应用, 2016, 42 (9): 143-146

[5] 苏连栋. 光纤通道在综合航电系统应用中的关键技术 [J]. 飞机设计, 2007, 27 (4): 66-70

[6] 沙永忠, 冯巧宁, 刘明, 等. 光纤通道航电总线数据采集器设计 [J]. 测控技术, 2014, 33 (3): 106-109

[7] 杨哲, 王鹏, 徐茜. 基于 RTR 的遥测数据实时处理软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 165-167

[8] 冻伟东, 鲜峰, 吕晔. 实时遥测数据信源压缩技术 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (5): 1120-1123

[9] 袁炳南, 于艳, 张俊芳. 飞行试验多目标遥测监控及其技术实现 [A]. 2008 年航空试验测试技术论文集 [C]. 2008.

[10] 贺思捷, 刘大同, 彭宇. 遥测数据驱动的无人机飞行状态识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37 (9): 2004-2013

(上接第 9 页)

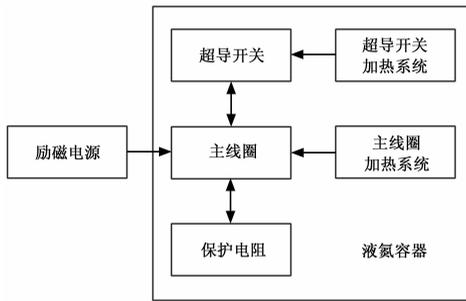


图 6 失超保护电路简要示意图

主线圈、超导开关和保护电阻以并联的连接方式置于液氦容器内。超导开关由超导导线制作而成, 加热系统工作, 超导开关电阻上升, 形成主线圈和外接电源的充磁循环回路, 阶段性提升电流用于步骤充磁; 加热系统停止工作, 超导开关超导, 拔掉外接电源, 形成主线圈和超导开关的无电阻循环回路。主线圈配加热系统同样用于改变其电阻保护超导线圈。系统失超时, 储存在无电阻循环回路中的能量由保护电阻发热释放, 导致温度升高, 同时液氮挥发, 带走热量, 保护超导线圈。

5 测试结果与分析

本系统在工程实际中经过 72 小时的连续测试, 数据采集间隔为 1 秒, 串口通道选择为 COM1, 标定文本文件根据磁体和传感器手动选取。系统测试显示界面如图 7 所示, 三端温度和冷屏等处温度实现实时显示, 且波形显示良好, 若温度超过预定范围, 报警指示灯提示; 液氮容器液位信息显示准确; 失超保护电路正常配备, 失超保护指示灯未提示, 失超保护未启动; 采集数据后台以文本文件保存至本地, 以备数据查询和分析。

测试结果显示该系统满足励磁过程的测控要求。三端温度均浮动于 4.2 K 上下, 摆动范围合理, 且数据准确。励磁稳定后, 通过铁片补偿, 测试架范围内磁场达到设计要求场强, 并

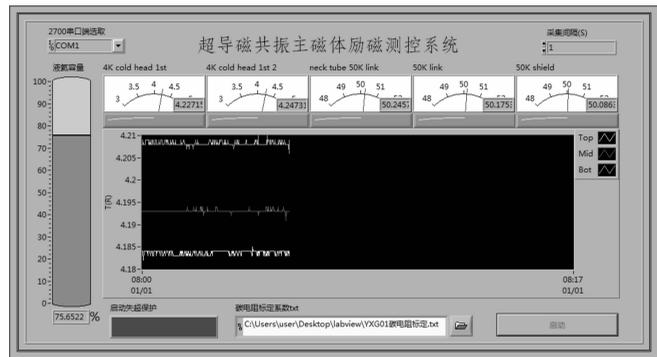


图 7 测试实现显示界面

且均匀稳定。因此, 本文系统不仅仅满足励磁测控要求, 在匀场测试和磁共振工作状态下依然适用并且有效。

6 结语

本文设计基于 LabVIEW 平台的超导磁共振主磁体励磁测控系统, 采用队列状态机的多生产者-多消费者构架 (DEMO), 调用动态链接数据库 (DLL) 文件控制 KE2700 完成数据采集任务, 保证了励磁系统稳定性、可靠性和安全性。该系统多线程和模块化的结构设计易于后期修改和功能扩展, 全面并且准确的传感器和测试点选择为越来越多的超高场磁共振设备的励磁过程提供了测控系统的设计基础和参考。

参考文献:

[1] 金建勋, 等. 高温超导体及其强电应用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.

[2] 杨志达, 韩伟实, 周杰. 基于 LabVIEW 的超导磁体数采与测控系统研究 [J]. 超导技术, 2007, 35 (6): 3512-514, 519.

[3] 侯国屏, 王坤, 叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-4.

[4] 蒋薇, 张晓波, 等. 基于 LabVIEW 的仪器通信技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 1030-1032.