

射频超导腔性能测量平台的设计与实现

李爱玲, 郑 健, 周立鹏, 彭朝华, 陆 泽

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 射频超导腔的无载品质因数 Q_0 和加速梯度 E_a 是评价腔性能的重要指标; 为了得到铌溅射超导腔的性能参数, 研制了一套射频超导腔性能测量平台, 实现 Q_0 和 E_a 的测量; 测量平台由单腔低温柜和超导腔性能测量设备: 信号源、功率计和数据采集卡组成; PLC 控制真空计、压力传感器、温度传感器和步进电机等设备监测、控制单腔低温柜内的 4.2 K 低温环境和超导腔的调谐与功率耦合; 超导腔性能测试程序基于图形化编程语言 LabVIEW 开发, 由计算机远程操作测试过程; 通过接受信号源和功率计的 USB 通讯接口传送的数据以及采集 PCI 总线上数据采集卡的信号, 经过数据处理后实时显示测量值和 Q_0 和 E_a 的测试结果, 并存入数据库随时调用; 测量结果表明, 测量平台实现了对铌溅射射频超导腔的性能评价, 性能参数达到了设计要求。

关键词: 射频超导腔; 无载品质因数; 加速梯度; LabVIEW

Design and Implementation of RF Superconducting Cavity Performance Measurement Platform

Li Ailing, Zheng Jian, Zhou Lipeng, Peng Zhaohua, Lu Ze

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The unloaded quality factor Q_0 and accelerated gradient E_a of RF superconducting cavity are important parameters for evaluating the performance of the cavity. In order to obtain the performance parameters of Nb sputtered superconducting cavity, a RF superconducting cavity performance measurement platform was developed to measure Q_0 and E_a . The measurement platform is composed of a single-cavity cryogenic cabinet and a set of superconducting cavity performance measurement equipments such as signal source, power meter and data acquisition card. The single-cavity cryogenic cabinet provides 4.2 K cryogenic environment by PLC controlled vacuum gauge, pressure sensor, temperature sensor and stepper motor. The superconducting cavity performance test program is developed based on graphical programming language LabVIEW and computer-operated remote control operation is realized. Through receiving the data transmitted by the USB communication interface of signal source and power meter, and collecting the signal of data acquisition card on PCI bus, the measured values and the test results of Q_0 and E_a are displayed promptly after data processing. These data is stored in the database and can invoke them at any time. Result from the test proves that the measurement platform realizes the evaluation of Nb sputtered RF superconducting cavity, and the performance parameters meet the design requirements.

Keywords: superconducting cavity; unloaded quality factor; acceleration gradient; LabVIEW

0 引言

串列升级工程超导增能段的设计指标为 2 MeV/q, 核心部件由 4 个四分之一波长的铜基铌溅射射频超导腔组成, 谐振频率 150.4 MHz, $\beta = 0.1^{[1]}$ 。在铜基腔上溅射一层很薄的铌膜, 大约 4~5 μm , 当铜铌腔处在 4.2 K 的低温环境中, 铌膜处于超导态, 用很小的射频功率就能在腔内建立较高梯度的高频电磁场。

在超导腔安装到加速器上之前, 需要对腔的超导性能进行准确测量, 以确定是否达到预期设计目标, 为此建立了一套性能测量平台, 对射频超导腔重要参数无载品质因数 Q_0 和加速梯度 E_a 的进行评价, 要求超导态下 Q_0 达到 10^8 以上

才能满足要求。由于射频超导腔的频带带宽很窄, 品质因数不能直接测量, 而是通过测量功率再进行计算得到, 再由品质因数计算得到加速梯度。在测量过程中, 超导腔处于过耦合状态时, 获取射频超导腔的前行功率 P_f 、反射功率 P_r 、pick-up 信号, 并计算得到 pick-up 信号功率 P_i 、射频超导腔的损耗 P_c 、衰减时间常数 τ 、无载品质因数 Q_0 、有载品质因数 Q_L 和加速电场梯度 E_a 等参数, 要求性能测量系统实时性高、稳定可靠且有很高的精度。基于测量平台的应用需求, 射频超导腔性能测量过程由计算机控制, 远程操作测试过程; 图形化编程语言 LabVIEW 开发应用软件, 界面图形化, 程序修改方便; 采集的数据经处理后用曲线直观实时显示测试结果, 并存入数据库随时调用。

1 射频超导腔性能测量平台简介

测量平台由单腔低温柜和超导腔性能测量设备组成, 结构如图 1 所示。

射频超导腔性能测量时, 将腔放置于单腔低温柜内。低温柜的核心部分利用液氮冷却以达到 4.2 K 的低温; 在

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-06-10。

基金项目: HI-13 串列加速器升级工程资助项目; 中国核工业集团有限公司集中研发项目支持(FA18000201)。

作者简介: 李爱玲(1973-), 女, 河南郑州人, 博士, 高级工程师, 主要从事加速器控制技术方向的研究。

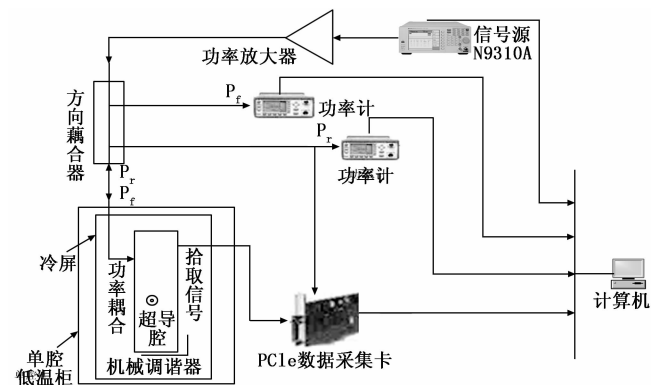


图 1 射频超导腔性能测量平台结构示意图

低温柜的外围真空容器与核心部分间设置一个利用液氮冷却的冷屏以降低液氮的热负载。在降温过程中,需要监测低温柜上液氮和液氮出口的气体压力以及柜内的真空度;使用步进电机驱动机械耦合器调节腔体频率,驱动功率耦合器改变耦合状态;使用铂电阻 Pt100 温度传感器监测冷屏温度,保证冷屏内液氮充足;lakeshore DT670 温度传感器监测腔体的温度,确认腔体是否处于超导态,同时监测液氮罐内液氮的储量,避免由于超导腔的损耗等原因使超导腔内没有充足液氮导致实验无法正常进行。单腔低温柜控制系统硬件使用横河 FA-M3 系列可编程控制器(Programmable Logical Controller, PLC)控制设备运行,实现抽真空、冷屏预冷、液氮罐和射频超导腔腔降温以及 4.2 K 低温环境建立等功能^[2]。

当射频超导腔内灌入液氮,维持温度在 4.2 K 时,开始腔的超导性能测量。首先将高频功率通过电容式耦合器把功率耦合进腔体,超导腔在射频功率的驱动下建立电场。理想状态下,超导腔的谐振频率和高频功率源的频率相等,但是由于各种原因会导致超导腔的谐振频率漂移。低温下超导腔的 Q 值很高,频带带宽约为 1.44 Hz,这么窄的带宽会导致超导腔和高频功率源失谐,虽然有通过步进电机驱动的机械调谐器调节腔体频率,但是相应速度不高,这样会导致高频功率很难馈入到腔内,因此需要通过过耦合拓宽超导腔的带宽到大约 10 Hz^[3]。

当腔体里的谐振场完全建立起来后,超导腔进入稳定态,开始射频超导腔性能参数测量。从信号源 N9310A 产生的高频信号经过功率放大器放大后馈入腔内,用功率计 E4418B 分别测量前行功率 P_f 和反射功率 P_r ,数据采集卡测量 pick-up 信号和反射功率信号,经过数据运算得到 pick-up 信号功率 P_i 、射频超导腔的损耗 P_c 、腔的衰减时间常数 τ 和耦合系数 β ,其中腔耦合系数选择过耦合,衰减时间常数由 pick-up 信号测量曲线数据处理得到。

$$\beta = \frac{1 + \sqrt{P_r/P_f}}{1 - \sqrt{P_r/P_f}} \quad (1)$$

$$P_c = P_f - P_r - P_i \quad (2)$$

再由公式 (3) ~ (4) 计算得到无载品质因数 Q_0 和加速电场梯度 E_a ^[4-6]。

$$Q_0 = 2\pi f(1 + \beta)(1 + P_r/P_c)\tau \quad (3)$$

$$E_a = A \sqrt{P_c Q_0} \quad (4)$$

其中: A 是由腔的几何形状决定的常量。

2 基于 LabVIEW 的射频超导腔性能测试数据采集系统

射频超导腔性能测量系统的硬件由 PC 机、数据采集卡、信号发生器、功率计等设备组成,其中信号发生器和功率计设备的通讯接口为 USB,数据采集卡通过 PCI 总线与 PC 机通讯;控制软件要完成 2 个 USB 通讯接口的设备控制和数据采集卡采集数据,要进行复杂的数据运算得到处理结果并实时显示,要通过 EPICS 接口与上位机连接。测量系统要实现这些功能,利用 LabVIEW 开发周期短、编程直观、便于实现测量系统的协调和管理、提供了丰富的数据分析库函数,且人机交互界面直观友好的特点,设计了基于 LabVIEW 的射频超导腔性能测试数据采集系统的控制界面和控制程序,达到了射频超导腔的性能测量要求。

设计的射频超导腔性能测量系统的控制程序主要由 5 部分组成,包括腔谐振频率搜索模块、功率计数据采集模块、测试曲线实时显示模块、时间常数 τ 计算模块、 Q_0 和 E_a 计算模块,软件框图如图 2 所示。

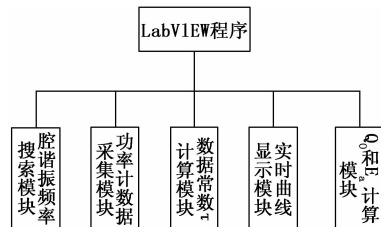


图 2 数据采集系统软件框图

在设计控制界面上,输入信号发生器产生波形的幅度、周期和脉宽等参数,N9310 根据此信息生成波形并将信号送入功率放大器放大后馈入超导腔;根据测试需求选择测量状态,此时功率计 E4418B 传送射频功率,数据采集卡采集数据,程序接收仪器传来的数据,经过处理之后以图形或数字的形式显示给操作员。

2.1 电缆校准

在测量功率时,由于方向耦合器的耦合、电缆和功率计的引入等造成的损耗会影响功率测量值的准确性。因此,需要在测量前,对功率计在超导腔的工作频率附近进行频率校准,然后根据实际测量时所需的电缆和双向耦合器的连接情况,在工作频率附近离线得到前行功率 P_f 、反射功率 P_r 的插损,在测量中用插损值对测量值进行校准得到实际功率。

2.2 功率计和信号发生器的数据采集

射频功率信号在馈入射频超导腔的过程中,传输功率

进入腔内建立高频电场, 反射功率从射频超导腔的功率耦合器反射回来。通过双向耦合器, 传输功率和反射功率可以直接利用 Agilent 双通道功率计 E4418B 测量; 信号发生器 Agilent N9310A 作为射频信号源, 它们都通过 USB 接口与 PC 机通讯。

VISA (Virtual Instrument Software Architecture) 是用来与 RS232、GPIB、VXI 和 USB 总线进行通信的应用编程接口, 功率计和信号发生器都采用 VISA 的子 VI 来开发设备的 labVIEW 驱动^[7], 包括打开串口 VISA Open.vi, 将缓冲区的数据写入指定接口的 VISA Write.vi, 读取指定数量字节至缓冲区的 VISA Read.vi, 以及关闭打开的串口的 VISA Close.vi。功率计 E4418B 的 labVIEW 驱动子 VI 主要包括设备初始化 initialize.vi, 获得设备类型 Get Sensor Type.vi, 测量参数配置 Configure Measurement.vi, 参数极值配置 Configure Limits.vi, 数据读取 Read.vi, 关闭设备的 Close.vi。信号发生器 N9310 的 LabVIEW 驱动子 VI 主要包括配置状态、频率和幅度的 Configure RF Output.vi, 设置模块使能的 Configure Modulation Enabled.vi, 和关闭设备的 Close.vi。

在编写功率计程序时, 在前面板上预先配置好仪器的地址和选取的通道, 设备初始化后, 获得设备型号 E4418B, 然后配置功率单位、分辨率、测量功能等参数, 以及高低测量功率极值, 最后由读取子 VI 将功率数据取出^[8]。对于信号发生器 N9310, 首先调用配置射频信号输出 VI 设置欲产生信号的频率和幅度, 并配置调制使能模块, 然后将脉冲周期、脉冲宽度、是否允许脉冲调制、脉冲调制信号源是内部产生还是外部接入等信息通过 VISA 写模块向仪器写入产生波形的参数, 仪器根据这些信息产生所需要的波形^[9], 程序如图 3 所示。

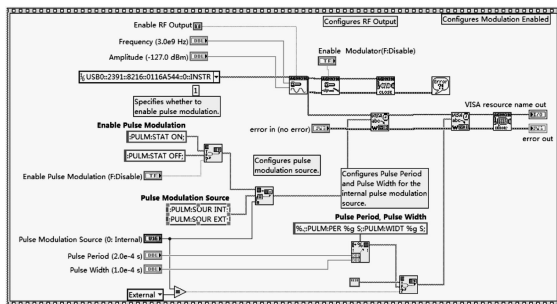


图 3 信号发生器 N9310 的 LabVIEW 程序

2.3 射频超导腔谐振频率搜索

超导腔内高频电磁场的信号拾取器 (Pickup) 是一个探针, 我们采用的方法是将高频同轴电缆的内导体伸入到射频超导腔里。射频功率馈入射频超导腔内建立高频电场的强弱通过信号拾取器的信号反映出来。信号的包络大小随射频信号源频率与超导腔频率的匹配度变化, 当信号源频率与射频超导腔谐振频率一致时, 探测器 pick-up 信号达到最大值, 此时射频功率馈入超导腔内最多, 腔内高频电

场幅度最大, 可以开始超导腔性能测量。射频超导腔的谐振频率通过数据采集卡采集 pick-up 信号随信号源频率变化的关系曲线得到。

数据采集卡选取 NISPECTRUM 公司的数据采集卡 M4i. 2234, 它支持 4 路模拟电压输入, 内部使用 10 bit 的 ADC, 最高采样率可达 2 GHz。反射功率信号由数据采集卡通道 0 采集, 探测器 pick-up 信号由通道 1 获得。使用该采集卡的 LabVIEW 驱动可以很方便的编写数据采集程序。

首先调用 select.vi 和 init device.vi 打开采集卡并读出每个模拟输入通道的设置信息, 包括模拟通道数量、输入信号范和 ADC 的分辨率以及单独输入或差分输入、DC/AC 耦合等参数的使能信息; 然后调用 setup M4i AI channel.vi 完成每个通道的初始化设置, 包括 1 通道使能、单独输入、DC 耦合和 1 000 mV 的测量范围; 接着设置为单次测量、采样频率 1 250 MHz、内部产生时钟信号和软件触发^{10[10]}; 这些设置完成后, 开始进行采集数据。

在谐振频率附近, 设置搜索频率范围, for 循环依次设置信号发生器产生连续波的频率, 采集 pick-up 信号, 用快速希尔伯特变换取出包络, 经中值滤波, 得到的复信号的模的最大值即为该频率下对应的 pick-up 信号。根据 pick-up 信号与对应的频率值的二维数组, 得到 pick-up 信号最大值对应的频率即为谐振频率 $f_0 = 1.504\ 928 \times 10^8$ Hz, 程序如图 4 所示。

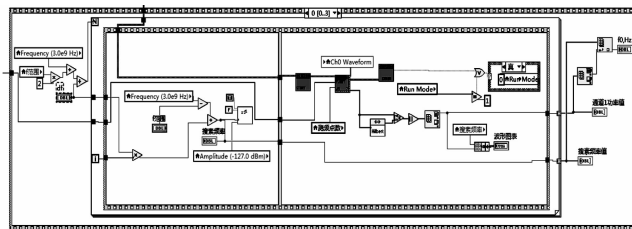


图 4 谐振频率搜索程序图

2.4 Q_0 和 E_a 计算

公式 (4) 表明: 当馈入到腔内的射频功率一定时, 具有更高 Q_0 的腔会获得更高的电磁场强度, 即更高的 E_a 。因此, 在对超导腔性能测量进行评估时, 这两个参数至关重要。

在 Q_0 测量时, 信号源输出周期为 2 s、脉宽为 0.8 s、幅度为 -40 dBm 的方波, 经射频功率放大器放大后馈入射频超导腔, 数据采集卡采集的图形可以清楚显示一个方波周期内射频功率开始激励—稳态—停止输出的反射波形和 pick-up 波形的变化。已知当射频功率停止激励时, 射频超导腔中储存的功率随时间常数 τ 以指数函数衰减, 因此计算 pick-up 波形尾部从高点下来的指数函数即可求得衰减时间常数 τ 。

当射频超导腔的温度维持在 4.2 K 时, 开始自动测量, 首先信号源输出随频率变化的连续波进行谐振频率搜索, 得到谐振频率 f_0 ; 然后设置信号源的频率 f_0 、周期、脉宽、

幅度等参数输出方波到射频功率放大器, 并通过功率耦合器馈入超导腔; 系统读取功率计读数结合反射功率和入射功率的插损计算出 P_f 和 P_r 的值, 并根据公式计算出耦合系数 β 值; 数据采集卡采集 pick-up 和反射信号的波形并经过处理得到 τ 和功率 P_r , 根据这些值计算得到 Q_0 与 E_a 值。系统总的测量流程如图 5 所示。

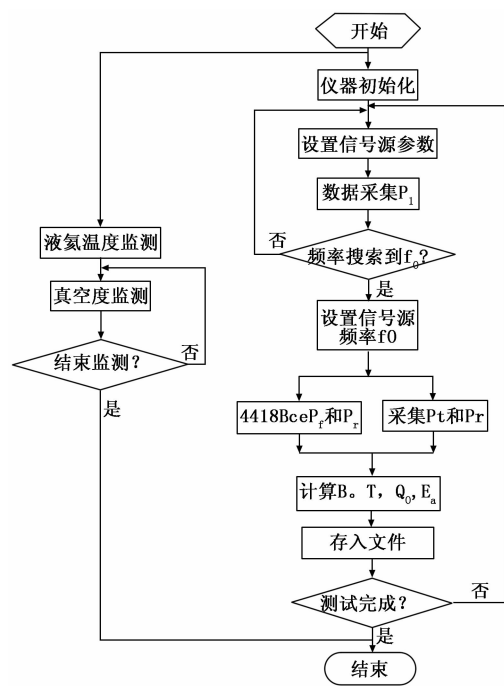


图 5 射频超导腔性能测量流程图

射频超导腔性能测量界面如图 6 所示。由于测量是全自动的, 因此在测量之前, 需要输入数据采集卡、功率计、方波和功率插损等控制参数和计算所需的参数, 设置完成

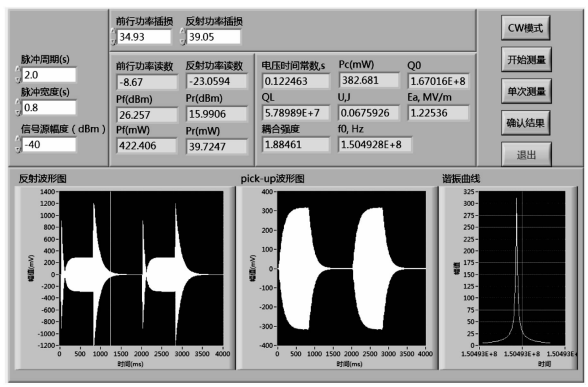


图 6 射频超导腔性能测量界面

后, 进入等待采集的状态, 由操作员控制数据的采集过程。在界面点击“单次测量”按钮, 在前面板实时显示一次的测量值和计算结果。如果操作人员认可测量结果, 可以点击“确认结果”; 也可重新进行单次测量, 直到对测量结果满意并退出测量。实验中的数据都保存到文件中, 方便以后对比和查阅。

从图中可以看出, 射频超导腔的无载品质因数 Q_0 为 1.67016×10^8 , 有载品质因数 Q_L 为 5.78989×10^7 , 加速梯度 E_a 为 1.22536 MV/m , 性能参数达到了设计要求。

3 结束语

LabVIEW 是一种功能强大的图形化编程软件, 用它的 G 语言编写的射频超导腔性能测试数据采集系统, 对研制的铌溅射超导腔进行了超导性能测试, 通过测量的前行功率和反射功率数值, 以及采集的 pick-up 信号, 经数据处理得到了无载品质因数、有载品质因数和加速梯度等参数。对其它三台铌溅射超导腔进行了同样的测试, 结果表明这些超导腔满足了设计要求, 在工程上已经实际运行。实验证明, 该测试系统运行稳定, 操作方便, 也可应用于镀铅射频超导腔和分离环射频超导腔性能测试, 为以后射频超导腔研制工作提供了重要测量平台。

参考文献:

- [1] 超导重离子直线加速器和束流脉冲系统初步设计说明书 [Z]. 2005.
- [2] 内部资料. 单腔低温柜的技术说明书 [Z].
- [3] 彭朝华. BRIF 工程 QWR 腔、低温恒温柜和 ISOL 高质量分辨率物理设计 [D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2005.
- [4] Padamsee H, Knobloch J, Hays T, et al. RF Superconductivity for Accelerators [M]. New York: Wiley, 1998: 160-164.
- [5] 张娟, 等. 基于 Labview 的超导腔测试数据采集系统 [J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33 (9): 1098-1103.
- [6] 洪越明, 等. 用 LabVIEW 开发射频超导谐振腔垂直测量远程测试系统 [J]. 国外电子测量技术, 2004, 1: 2-5.
- [7] LabVIEW TM User Manual, National Instrument [Z]. 1998.
- [8] E4418B Power Meter Programming Guide [Z]. Agilent Technologies.
- [9] N9310A RF Signal Generator User's Guide [Z]. Chinese. Agilent Technologies.
- [10] M4i/M4x LabVIEW Driver manual [Z]. Spectrum Systementwicklung Microelectronic GMBH.
- [8] 吴建军, 张育林, 陈启智. 大型泵压式液体火箭发动机故障综合分析 [J]. 导弹与航天运载技术, 1996, (1): 10-15.
- [9] 黄强. 高压补燃液氧煤油发动机故障检测与诊断技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2012.
- [10] 姚四伟, 张力先, 李建军. 某型发动机涡轮叶片烧蚀故障分析与预防 [J]. 失效分析与预防, 2006, 1 (4): 27-29.

(上接第 53 页)

- [5] 党锋刚, 马红宇, 李春红, 等. 液氧煤油发动机稳态故障仿真分析 [J]. 火箭推进, 2012, 38 (2): 27-31.
- [6] 王之任. 近代大型液体火箭发动机的特点 [J]. 推进技术, 1991, 12 (4): 29-35.
- [7] 李艳军. 新一代大推力液体火箭发动机故障检测与诊断关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2014.