

文章编号: 1007-4627(2014) 02-0152-04

锁相环在超导射频技术中的应用

常玮^{1, 2}, 何源¹, 李春龙¹, 高郑^{1, 2}, 朱正龙¹, 薛纵横¹, 宋玉堃¹, 张锐¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用压控振荡器锁相环路 (VCO-PLL) 锁定超导射频谐振腔体的本征频率, 使腔体稳定谐振。在原理验证阶段, 利用 NI-Labview 对实验原理做了仿真。得到的仿真结果显示, 环路增益选取的不同会直接影响整个系统的锁定状态。在实验测试阶段, 根据原理和仿真结果搭建了相应的实验平台, 从而得到环路锁定的测试结果。最后在低温超导态测试阶段, 用经过验证的实验平台对 IMP-HWR010 超导腔体进行了频率锁定测试, 并得到了腔体频率随氦压变化的实际测量结果, df/dp 约为 0.73 Hz/Pa。

关键词: 超导射频技术; 锁相环; Labview

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.152

1 引言

超导射频技术 (Superconducting Radio Frequency, SRF) 作为 20 世纪后期出现的一种重要的新技术越来越多地应用在粒子加速器领域。全球粒子加速器领域的很多实验室和高校, 例如欧洲核子中心 (CERN)、美国阿贡实验室 (ANL)、康奈尔大学 (Cornell University) 等等^[1], 都在长期发展着这项技术从而不断地提升粒子加速器的功能和效率。我国目前正在进行的新项目: 加速器驱动次临界系统 (China-ADS), 也在使用这项新技术建造加速粒子的超导射频谐振腔体^[2]。

超导射频谐振腔体与常温谐振腔体的最大不同点在于其纵向加速电场梯度 E_{acc} 和本征品质因数 Q_0 非常高, 超导体体的 Q_0 较常温腔体高约 5 个数量级^[1]。

超导体体在垂直测量实验时, 前向功率耦合器的耦合系数要求约为 1 (临界耦合), 即 $\beta = Q_0/Q_{ext.FPC} \approx Q_0/Q_L \approx 1$, 其中 $Q_{ext.FPC}$ 是前向功率耦合器的外部品质因数, Q_L 为负载品质因数, 由此可得 Q_L 与 Q_0 基本相同。对于 IMP-HWR010 超导体体, 其本征频率 f_0 约为 162.5 MHz, Q_0 在 1×10^9 数量级上, 所以 Q_L 也在这个数量级, 此时系统带宽

$BW = (f_0/Q_L)$ 将 < 1 Hz。

常温腔体由于 Q_0 低五个数量级, 前向功率耦合要求也约为 1, 所以同理可得测试时系统带宽 BW 将宽达几百 kHz。

在外界因素如机械振动或环境温度变化的影响下, 腔体的本征频率将发生变化, 这个变化包括慢变化和颤噪效应的快变化, 慢变化可以通过调节信号源频率用手动方式或计算机程序控制方式跟踪, 而颤噪效应的快变化无法用上述方法跟踪。颤噪效应的快变化造成的腔体本征频率变化通常在 1 kHz 以内^[3], 对于常温腔体几百 kHz 带宽而言谐振不会受太大影响; 而对于超导体体 < 1 Hz 的带宽而言, 如不加快速反馈控制系统腔体将不能谐振。所以, 在垂测试验中, 使用调谐器控制常温腔体频率的方法是不能让超导体体谐振的, 需要用负反馈技术让高频信号源去锁定超导体体的频率。通常有 2 种方法^[4]: (1) 调谐振频率法, 即输入谐振腔体的功率信号频率不变, 通过机械调谐机构和电子学 PID 控制器调整腔体频率使之稳定在输入信号频率点上; (2) 频率跟踪法, 让输入谐振腔体的信号频率通过锁相环路实时与腔体本征频率锁定。本文主要讨论第 2 种方法实现超导体体谐振所用到的锁相环技术。

收稿日期: 2013-08-29; 修改日期: 2013-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91026001)

作者简介: 常玮 (1984-), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 从事超导直线加速器研究; Email: chang@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

2 锁相环实现超导谐振腔体谐振的原理与模拟仿真

借助锁相环技术可以实现对超导腔体频率的锁定, 这种方法相当于用频率跟踪法来实现超导腔体谐振。而超导腔体是一个高 Q 的窄带宽系统, 其提取信号可以等效成一个快速变化的相位调制信号。因此可以通过比较压控振荡器与该相位调制信号之间的相位差, 来得到误差电压 V_{err} , 再用负反馈使 V_{err} 趋近于 0 值。该方法主要是借助锁相环路, 反复把误差电压 V_{err} 反馈给压控振荡器, 当 V_{err} 趋近于 0 时, 压控振荡器将时时刻刻都与超导腔体谐振频率一致。

2.1 锁相环锁定超导腔体频率原理

用锁相环实现对超导腔体谐振的原理图如图 1 所示。

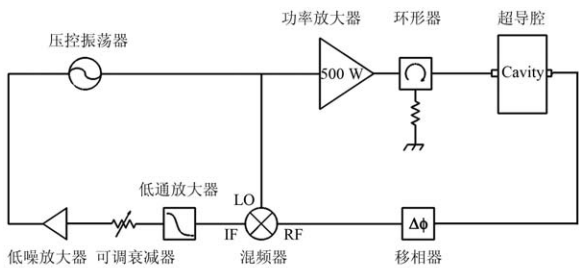


图 1 超导腔体谐振锁相环路原理图

其中核心部件有压控振荡器、混频器和低通滤波器。压控振荡器输出频率信号分两路, 其中一路通过

功率放大器放大后送入超导腔体, 另一路送入混频器的 LO 端; 超导腔体接收到功率信号后由取样口提取出传输信号送入混频器的 RF 端; LO, RF 两路信号经过混频器混频后由 IF 端输出, 再经低通滤波器滤掉高频成分则得到鉴相电压信号; 鉴相电压信号通过可变衰减器和低噪放大器调理后得到误差电压 V_{err} , 将误差电压送回压控振荡器使压控振荡器输出频率变化; 变化后的频率信号再次经过谐振腔、混频器、低通滤波器产生新的鉴相电压信号; 整个过程以电子学响应速度高速反复迭代后, 鉴相电压信号 V_{err} 将趋近于 0, 压控振荡器 (高频信号源) 的输出频率将时刻跟踪超导谐振腔变化频率。

2.2 锁相环锁定超导腔体频率的模拟仿真

借助 NI-Labview 编写仿真程序, 可以模拟上述锁相环路的整个工作过程。模拟程序的主要代码框图如图 2 所示, 主要包含 4 个部分: 压控振荡器模块 (图中数字 1), 用来仿真真实世界的压控振荡器, 输入中心频率 f_0 、误差电压 V_{err} 、压控振荡增益 K_{vco} , 输出的是在 $f_0 - K_{vco} \times V_{err}$ 至 $f_0 + K_{vco} \times V_{err}$ 之间变化的频率信号; 波形生成模块 (图中数字 2), 用来产生各种调制的正弦信号并且可以增加噪声; 频谱分析模块 (图中数字 3), 用来实时显示压控振荡器输出信号的; 频谱混频鉴相算法模块 (图中数字 4), 用来实现两个频率信号的混频和低通滤波, 得到鉴相误差电平 V_{err} 。

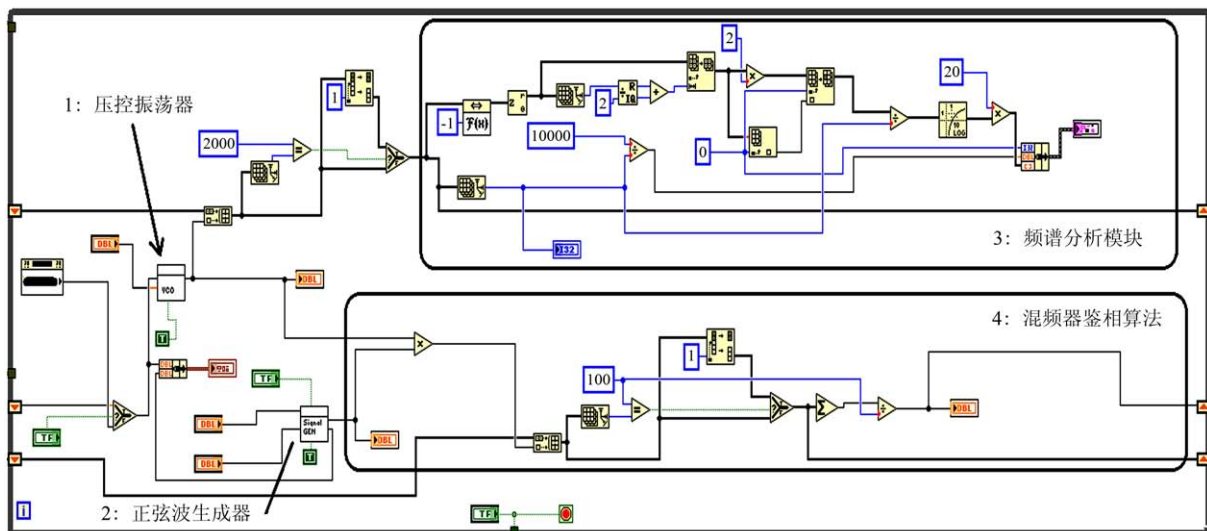


图 2 (在线彩图) Labview 锁相环锁定超导腔体频率模拟程序主要代码框图

仿真频率锁定的结果如图 3 所示，图中腔体提取信号为 FM 调制加白噪声的仿真信号。在锁相环开环状态时，鉴相电压 V_{err} 在 $-0.4 \sim +0.4$ 之间变化；锁相环闭环工作时的鉴相电压在极短时间内稳定在 $-0.1 \sim +0.1$ 内。

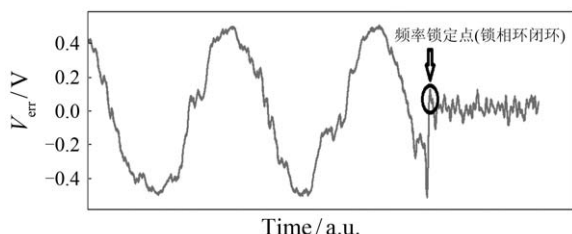


图 3 Labview 锁相环路锁定超导腔体频率模拟程序界面

仿真的另一个结果，发现整个环路的增益系数的选取很重要，环路增益太小会导致锁相环能力过弱而不能锁定，环路增益太大会导致环路振荡而失锁。如图 4 所示，三个仿真结果的环路增益分别为 $K = 2, 50$ 和 200 ；可以分别得到增益不足，锁相环闭环和锁相环振荡三个结果。

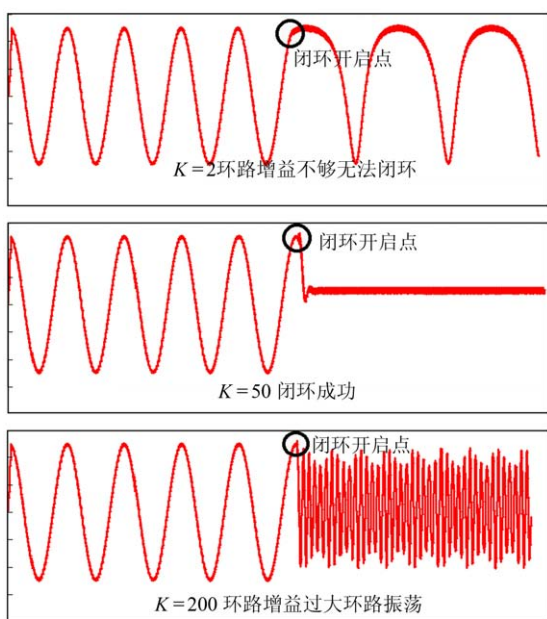


图 4 (在线彩图) 增益不足、锁相环闭环和锁相环振荡三种情况的仿真结果

因此在搭建真实的实验平台时，必须调整环路增益，避免增益不足和环路振荡。

3 实验平台搭建与测试

现场的硬件设备如图 5 所示。



图 5 (在线彩图) 实验平台现场的硬件设备

首先，可以选取带有外部 FM 调制功能的信号源作为压控振荡器，这样可以快速高效实现实验方案(本实验选取 Agilent 4428C 射频信号源)。信号源的外部 FM 调制功能开启后，通过调整 FM 调制深度可以实现压控振荡器的增益在 1 kHz/V 到 1 MHz/V 之间任意可调。

其次，选取混频器作为环路的鉴相器。通过给 LO 端、RF 端输入稳定的频率信号，变化 RF 端的相位后即可测得鉴相增益。本实验选取 mini-circuits ZFM-150+ 混频器和 DC~1.9 MHz 低通滤波器，以及手动可调衰减和 AD470 低噪运算放大器自制低噪放大器。

最后，选取 DC~20 kHz 的低通滤波器和对应频段的可变衰减器与低噪放大器，得到一个增益可调的环路滤波器。

用另一台带有内部调制功能的信号源作为相位调制输出，作为超导腔体的取样信号。这样可以实际模拟超导腔体测试过程中的锁频过程，当环路增益调整后，锁相环路即可工作。该方案在实验平台上测试效果的示波器截图如图 6 所示。

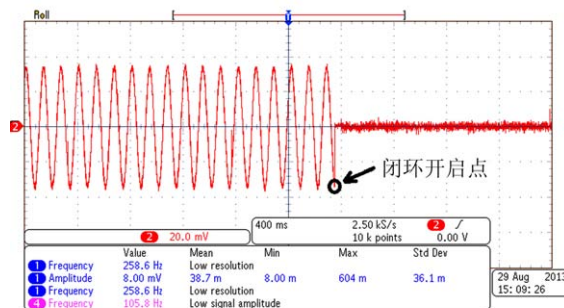


图 6 (在线彩图) 实验平台锁相环闭环实际测试效果

4 超导腔体低温超导态锁频实测结果

对 IMP-HWR010 超导腔体进行 4.2 K 低温超导

态测试, 用该原理实现的测试平台锁定了超导体腔体的本征频率。通过锁频测量得到杜瓦氦气压力与超导体腔体频率变化的关系原始数据截图如图 7 所示。图中由大多数数据点组成的线性直线图部分为 PLL 锁定时的测量点属于有效数据, 其它散点为 PLL 失锁时或手动扫频寻找超导体腔体频率点时信号源的频率输出属于无效数据。经过后期数据处理, 可以得到超导体腔体在外界气压 84000 ~ 91500 Pa 变化时, 频率变化范围在 162.9810 ~ 162.9865 MHz 之间。斜率 df/dp 约为 0.73 Hz/Pa。

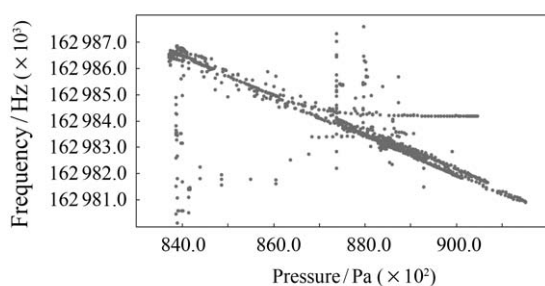


图 7 超导体腔体频率随氦气压力变化测量结果

5 结论与展望

应用锁相环技术可以实现对超导体腔体本征频率

的锁定。本文通过模拟仿真和搭建实验平台实际测试, 解释和验证了锁相环技术可以成功地实现对超导体腔体本征频率的锁定。在低温状态下, 利用实验平台对 IMP-HWR010 超导体腔体进行了频率锁定实际测量, 得到了超导体腔体频率随氦气压力变化测量结果。

在今后的工作中, 可以利用该实验平台对各种型号的超导体腔体进行进一步测试, 并且在该套实验平台上进一步发展出超导体腔体垂直测试、水平测试、以及超导体腔体射频锻炼平台。

参考文献:

- [1] HASAN P. RF Superconductivity for Accelerators[M]. New York: Cornell University, Ithaca, 1998.
- [2] HE Yuan. Low Beta Cavities at IMP[C]. Conference: Tesla Technology Collaboration (TTC) Meeting, Cornell University, NY, Jun. 12th, 2013.
- [3] KELLY M P, SHEPARD K W. Microphonics Measurements in SRF Cavities for RIA[C]. Conference: The 2003 Particle Accelerator Conference. Portland, Oregon USA, May 12, 2003.
- [4] POWERS T. Theory and Practice of Cavity RF Test Systems[C]. Conference: 12th International Workshop on RF Superconductivity, Ithaca, New York, 10-15 Jul 2005.

Application of Phase Lock Loop in Superconducting RF Technology

CHANG Wei^{1, 2, 1)}, HE Yuan¹, LI Chunlong¹, GAO Zheng^{1, 2}, ZHU zhenglong¹,
XUE Zongheng¹, SONG Yukun¹, ZHANG Rui¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The main issue of this paper is to introduce the application of phase lock loop (PLL) in superconducting RF technology. The voltage-controlled oscillator phase lock loop (VCO-PLL) can be used for locking the eigen frequency of the superconducting cavity. It can keep superconducting cavity resonant stably. In this paper, the principle of the cavity locking by the VCO-PLL is verified by a simulation, which is done by using NI-Labview software. The simulation result shows that the different gain of the PLL system can impact the locking situation of the whole system. In the test stage, the locking test plant is set up and passed validation. Finally, at the low temperature test stage, the frequency of the IMP-HWR010 superconducting cavity is locked by the test plant. The frequency change with helium pressure of the cavity is about 0.73 Hz/Pa.

Key words: Superconducting Radio Frequency; Phase Lock Loop; Labview

Received date: 29 Aug. 2013; Revised date: 24 Sep. 2013

Foundation item: National Nature Science Foundation of China(91026001)

1) E-mail: chang@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>