

文章编号: 1007-4627(2013)04-0425-05

## HIRFL 高频相位与幅度稳定系统

李强<sup>1</sup>, 林兴隆<sup>1</sup>, 许哲<sup>2</sup>, 王春晓<sup>2</sup>, 李靖<sup>1</sup>, 慈国辉<sup>1</sup>, 高宜海<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第 54 研究所, 河北 石家庄 050081;

2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 介绍了兰州重离子研究装置(HIRFL)主回旋加速器(SSC)高频系统高频电压的相位稳定与幅度稳定系统, 重点介绍了设备的组成和稳定环路设计以及正交变换与稳定环路滤波器的设计方法。通过在 SSC 腔体上进行的长期的现场测试, 得到了调制抑制制度与长期稳定度的测试方法, 并对结果进行了分析。其中, 设备的长期相位稳定度达到  $0.014^\circ$ , 长期幅度稳定度达到  $1.29 \times 10^{-4}$ , 远高于改造前的指标。

**关键词:** 相位稳定; 幅度稳定; 环路设计; 长期稳定度; 调制抑制制度

**中图分类号:** TL503.2      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.425

### 1 引言

在兰州重离子研究装置(HIRFL)中, 高频电压的相位稳定控制系统与幅度稳定控制系统(简称相幅稳定系统)是加速器腔体低电平稳定系统的主要组成部分<sup>[1-2]</sup>, 其主要功能是完成整个加速器系统各腔体之间的高频电压相位设置与稳定、幅度的设置与稳定、杂波调制的抑制等。旧的 HIRFL 相幅系统在 1988 年投入使用<sup>[1, 3]</sup>, 其相位稳定与幅度稳定都采用内环抑制杂波(模拟电路)、外环(数字实现)稳定长期相位与幅度的双环控制方案。随着数字化技术的提高, 国内外的高频低电平控制经历了从纯模拟技术实现、模拟 I/Q 到数字化 I/Q 实现的阶段<sup>[4]</sup>。数字 I/Q 普遍采用对输入信号进行 N 倍采样, 然后抽取并矢量旋转出 I/Q 信号的方法, 对 I/Q 信号进行直接控制, 如此不能直接得到信号的相位与幅度等信息, 也不易实现杂波调制的抑制<sup>[4]</sup>。在 HIRFL 改造工程中, 采用锁相环实现数字 I/Q, 直接对相位与幅度进行显示与单环控制, 在实现系统小型化、通用化的同时, 整体性能指标也得到了显著提高, 并成功地应用于注入器 SFC、源束线聚束器 B02、后束线聚束器 NB1 和 NB2、主加速器 SSC 的两个高频腔 D1 和 D2 等腔体的低电平稳定系统中。

### 2 相幅稳定系统的组成

相幅稳定系统由监控单元、相位与幅度稳定系统控制模块、高稳定时钟模块、恒温控制模块、(扩展)接口模块、电源模块、恒温箱、机箱和内部连接线缆等组成, 如图 1 所示。监控单元包括监控模块、液晶、按键和指示灯等部分, 为系统操作与显示提供人机操作平台, 并完成与总监控的信息交换; 将相位与幅度稳定系统控制模块、高稳定时钟模块等易受环境温度变化影响的系统部件安装在一个温度为  $(25 \pm 0.1^\circ\text{C})$  的恒温腔内, 这是实现长期稳定度的一项关键技术; 相位与幅度稳定系统控制模块是机箱的核心部件, 用以实现本机箱的主要功能, 该模块采用 A/D、D/A、FPGA 芯片、DSP 芯片为硬件核心的数字信号处理技术, 具有高精度、高温度稳定性、一致性好、可靠性高和易于系统升级等特点。高稳定时钟模块采用 10 MHz 恒温晶振驱动频率综合器实现, 具有长期稳定度高、相噪低的特点; 接口模块完成输入与输出信号的隔离与转换, 使信号符合机箱内部需求与外部需求; 电源模块包含两个交流转直流模块(AC/DC), 负责将 220 V 的交流转换成内部所需的直流, 其中一个 AC/DC 模块为所有恒温部分供电, 隔离了恒温供电对相幅稳定系统的影响。

收稿日期: 2013-01-09; 修改日期: 2013-03-19

作者简介: 李强(1971-), 男, 河北赞皇人, 高级工程师, 硕士, 从事卫星通信与稳定系统研究; E-mail: liq\_54@qq.com.

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

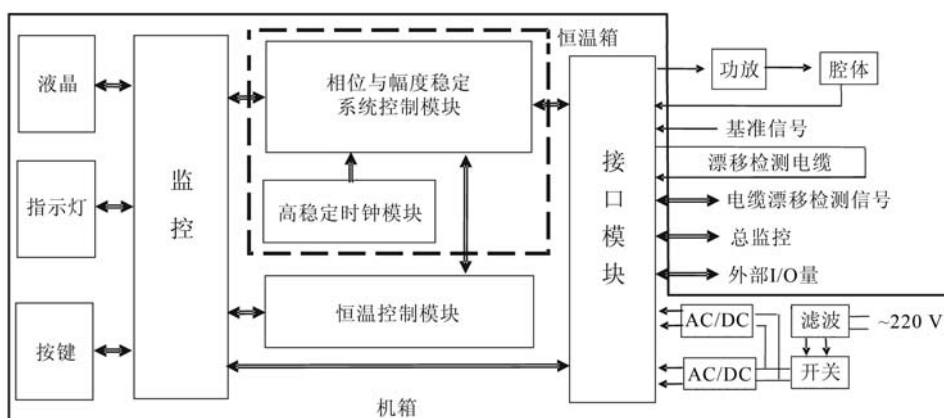


图 1 相幅稳定系统模块组成图

### 3 相幅稳定系统环路的原理组成

腔体的相位稳定系统(相稳环)与幅度稳定系统(幅稳环)采用负反馈环路实现,如图2所示。图中除功放、腔体与连接线缆外,其余功能模块均集成在一块印制板上组成了相位与幅度稳定系统控制模块的主体部分,相稳环与幅稳环都采用单个稳定环路设计,两个环路共用输入输出部分。相位与幅度稳定系统控制模块对输入的模拟信号进行滤波和可控放大,

然后进行A/D变换与数字下变频(DDC)、检波和鉴相等数字处理,对输出的数字信号进行D/A变换与滤波后直接输出到功放。图2中的粗实线连接部分的原理流程采用数字信号处理技术在FPGA芯片上实现,因此相位控制与幅度控制具有高精度和无零点漂移的特点。为消除连接腔体与设备之间的反馈电缆的相位漂移与损耗漂移,系统增加了电缆相位漂移补偿与损耗漂移补偿。

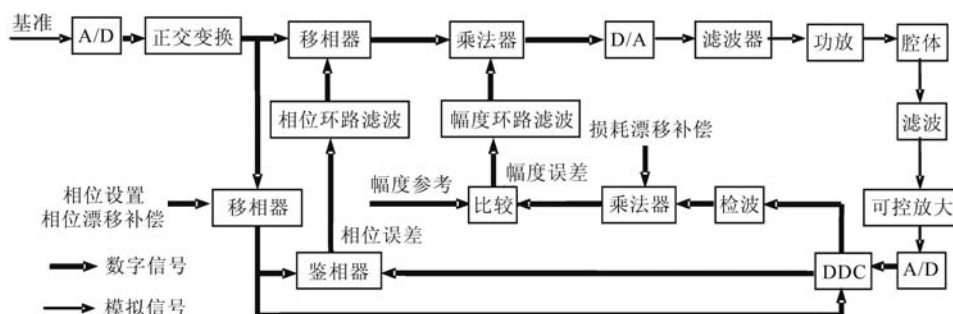


图 2 相幅稳定控制系统原理组成图

### 4 相幅稳定系统的具体设计

#### 4.1 正交变换与移相器

如图3所示,采用数字锁相环实现输入信号的无

误差相位跟踪,在数字锁相环后采用加法运算实现数字移相,如此设计可实现较大频率范围内的多路高精度移相。移相后经过相位幅度变换输出两路具有恒定幅度的正交信号。

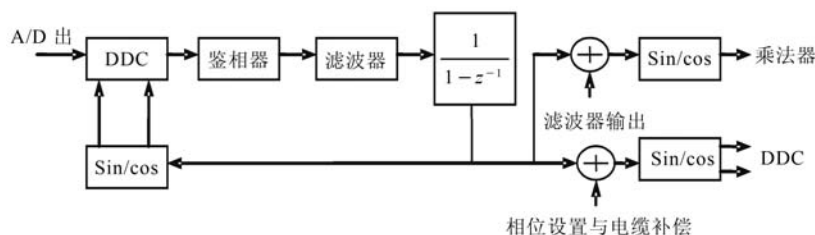


图 3 正交变换与移相器组成图

## 4.2 相位稳定系统的环路滤波器设计

在输入信号频率等于腔体自谐振频率时, 谐振腔体的相位传输函数<sup>[1]</sup>为

$$K_C(s) = \frac{1}{T_0 s + 1}, \quad (1)$$

$T_0 = Q/(\pi f_0)$ , 其中:  $f_0$  为腔体自谐振中心频率;  $Q$  为腔体自谐振的品质因数。

由于在不同工作频率下各个腔体的  $Q$  不同, 所以在不同频率下的参数  $T_0$  变化达 3 倍, 对系统控制性能造成较大的影响<sup>[1]</sup>。为抵消腔体在不同工作频率下传输函数变化产生的影响, 设计如下形式的环路滤波器:

$$F(s) = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1 s} \frac{1}{\tau_3 s + 1} (\tau_4 s + 1). \quad (2)$$

本环路滤波器分为 2 部分: 第 1 部分为 PI 控制, 包含前两项, 保证系统在低频段具有很高的开环增益, 其中  $\tau_1$  对应系统的开环增益,  $\tau_2$  和  $\tau_3$  根据腔体的抑制特性选择; 第 2 部分为最后一项, 是为了消除腔体传输函数的影响。在腔体自谐振中心频率等于输入频率时, 如果设定  $\tau_4 = T_0 = Q/(\pi f_0)$ , 则相位稳定系统的开环传递函数变为

$$G(s) = F(s)K_C(s) = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1 s} \frac{1}{\tau_3 s + 1}. \quad (3)$$

即系统的性能完全由  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  和  $\tau_3$  确定, 与腔体的传输函数无关。

相稳环的闭环传递函数为<sup>[5]</sup>

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{\tau_2 s + 1}{\tau_1 \tau_3 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s + 1}. \quad (4)$$

相稳环的闭环传递函数表征了环路对输入信号的相位具有低通跟踪性能, 可使腔体高频电压的相位准确跟踪基准信号的相位变化。

相稳环的闭环误差传递函数为<sup>[5]</sup>

$$E(s) = \frac{1}{1 + G(s)} = \frac{\tau_1 \tau_3 s^2 + \tau_1 s}{\tau_1 \tau_3 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s + 1}. \quad (5)$$

相稳环的闭环误差传递函数表征了环路对内部干扰相位具有高通滤波特性, 在零频上具有近似无限的抑制度<sup>[5]</sup>, 这是由于环路滤波器采用 PI 控制对环路内部的低频干扰具有极高的抑制度。

根据实际系统对调制抑制度的需求, 采用如下参数值:

$$\tau_1 = 1.8779 \times 10^{-6} \text{ (s/rad)},$$

$$\tau_2 = 3.8564 \times 10^{-5} \text{ (s/rad)},$$

$$\tau_3 = 2.652 \times 10^{-4} \text{ (s/rad)}.$$

利用双线性变换将  $s$  域的环路滤波器的传输函数变换到  $z$  域, 在 FPGA 芯片上实现。相稳环的环路滤波器采样速率为 1 Ms/s 以上, 其数字延时对环路影响很小, 因此在  $z$  域上系统传输函数造成的误差较小<sup>[5-6]</sup>。

## 4.3 幅度稳定系统的环路滤波器设计

幅度稳定系统的腔体幅度传输函数与式(1)的相同<sup>[1-2]</sup>, 从环路乘法器到检波器的幅度通道增益可以通过调整 A/D 前可控放大器的增益来自动适应。对腔体的不同工作频率与工作电压, 通道增益可以认为不变, 因此幅度稳定系统的环路滤波器设计也采用式(2), 其  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  和  $\tau_3$  的值与相位稳定环路滤波器的相同, 所以幅度稳定系统的闭环特性与相位稳定系统略有不同。

## 4.4 调制抑制制度实测

采用上述设计后, 采用内部调制方法测试腔体 SSC D1 相幅稳定系统的相位调制抑制制度与幅度调制抑制制度, 测试结果如表 1 所列。

表 1 实测的闭环调制抑制制度

| 调制频率/Hz | 要求抑制度/dB | 实测抑制度/dB |
|---------|----------|----------|
| 50      | 40       | 61.5     |
| 100     | 40       | 58.8     |
| 150     | 40       | 54.9     |
| 300     | 40       | 48.2     |
| 600     | 40       | 40.2     |
| 1000    | 25       | 33.1     |
| 2000    | 15       | 21.7     |
| 3000    | 5        | 15.3     |

由实测数据可以看出, 实测调制抑制制度优于指标要求, 与设计特性相符合。调制杂波频率在低于 600 Hz 以下具有 20 dB/10 倍频的抑制度, 对直流干扰具有近似无穷的抑制度。

## 5 长期稳定度实测

### 5.1 测试方法

测试框图如图 4 所示, 相幅稳定分机 1(简称分机 1)的相稳环闭环、幅稳环闭环; 相幅稳定分机 2(简

称分机 2) 的相稳环开环、幅稳环开环。采用监控计算机记录分机 1 和分机 2 的环路检波器、环路鉴相器输出值, 同时记录 SR844 锁定放大器输出值, 进行系统相位和幅度的长期稳定度测试。

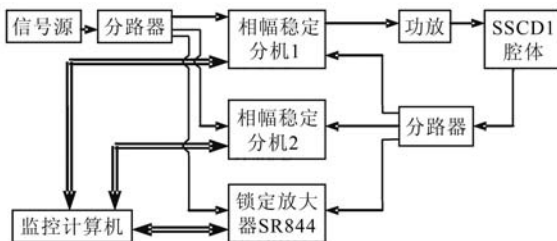


图 4 长期稳定度测试框图

## 5.2 数据记录与测试结果

经过 24 h 测试后, 根据监控计算机记录的数据, 用分机 1 与分机 2 的鉴相器输出的最大相位峰峰值除以 2 得到长期相位稳定度, 用锁定放大器输出的最大相位峰峰值除以 2 得到锁定放大器的长期相位稳定度; 选用分机 1 和分机 2 的检波器和锁定放大器输出幅度的峰峰值除以 2 倍的幅度的均值, 得到长期幅度稳定度。测试结果如表 2 所列。

表 2 实测的 24 h 长期稳定度

| 检测分机     | 长期相位稳定度 | 长期幅度稳定度               |
|----------|---------|-----------------------|
| 相幅稳定分机 1 | 0.0016° | $3.2 \times 10^{-5}$  |
| 锁定放大器    | 0.04°   | $3.5 \times 10^{-4}$  |
| 相幅稳定分机 2 | 0.0137° | $1.29 \times 10^{-4}$ |

## 5.3 测试结果分析

### (1) 相幅稳定分机 1 的测试结果分析

由于相稳环、幅稳环采用二阶一型环路, 幅稳环路检波器、相稳环路鉴相器的输出在零频附近具有近似无限的抑制度, 测试的结果为输出噪声的最大波动幅度, 所以长期稳定度远高于指标要求的相位稳定度 0.7° 和幅度稳定度  $2 \times 10^{-4}$ 。在降低输出滤波器的带宽后, 输出噪声的幅度减小, 测试出的长期稳定度还可以进一步提高。

### (2) 锁定放大器的测试结果分析

由于测试仪器 SR844 锁定放大器的增益准确度为  $\pm 0.25$  dB, 增益稳定度为 0.2%/°C, 达不到测试幅度稳定度指标的所需精度, 所以 SR844 锁定放大器测试结果仅作为参考。在室内采用空调设备的情况下, 可以看出 3 种测试结果中锁定放大器最差, 锁定放大

器测试结果是仪器本身的长期漂移。

### (3) 相幅稳定分机 2 的测试结果分析

根据分机 1 的测试结果与分析, 分机 2 的两路输入信号的相位差与幅度长期不变, 所以分机 2 的测试结果是它的检波器、鉴相器与传输通道的长期漂移。由于两台分机的组成结构、工作环境完全相同, 所以认为分机 1 的检波器、鉴相器与传输通道的长期漂移与分机 2 的相同, 由于分机 1 的检波器、鉴相器与传输通道的长期漂移将使腔体的相位与幅度偏离相同的值, 所以分机 2 的检波器、鉴相器的测试结果可以认为是由分机 1 组成的相幅稳定系统的长期稳定度。

### (4) 反馈电缆情况说明

在上述的测试过程中, 没有考虑连接腔体到设备的反馈电缆的影响, 实际系统中反馈电缆存在有相位漂移与损耗漂移, 因此, 需要采取电缆补偿措施以消除的反馈电缆的相位漂移与损耗漂移。

## 6 结束语

HIRFL 的低电平稳定系统采用合理的数字化设计, 可以适应较高的腔体  $Q$  值变化范围, 并达到较高的性能指标, 如此高的长期相位稳定度和长期幅度稳定度已经超过常规测试仪器(包括锁定放大器、矢量网络分析仪)的测试精度, 只能采用相同的设备进行测试。虽然 HIRFL 改造工作只需要 5.5 ~ 54 MHz 频率范围内的相幅稳定控制, 但是使用本设计不需要大的改动就可以在较低的频率上工作, 在外加变频措施后还可以工作在更高的频率上, 所以此设计方案可以广泛地应用于各种加速器腔体的高频相位与幅度稳定系统中, 具有较高的推广应用价值。

## 参考文献(References):

- [1] MA Ruichang, WANG Fang, HUANG Wenxue. Application of Electronic Technique, 1997, 10: 22. (in Chinese)  
(马瑞昌, 王芳, 黄文学. 电子技术应用, 1997, 10: 22.)
- [2] QIU Yingwei, SUN Hong, TANG Jingyu. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1908. (in Chinese)  
(邱颖伟, 孙虹, 唐靖宇. 强激光与离子束, 2008, 20(11): 1908)
- [3] ZHANG Shenghu, XU Zhe, ZHANG Qiuyu *et al.* Nuclear Physics Review, 2009, 26(2): 123. (in Chinese)  
(张生虎, 许哲, 张秋余, 等. 原子核物理评论, 2009, 26(2): 123.)
- [4] ZHANG Lei, SUN Hong. Foreign Electronic Measurement Technology, 2006, 25(12): 27. (in Chinese)

- (张磊, 孙虹. 国外电子测量技术, 2006, 25(12): 27.)
- [5] WEN Xidong. Automatic Control Theory and Its Application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004: 165–180. (in Chinese)
- (温希东. 自动控制原理及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 165–180.)
- [6] LU Guanghua, ZHANG Linrang, XIE Zhibo, *et al.* Digital signal process[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005: 102–138. (in Chinese)
- (陆光华, 张林让, 谢智波, 等. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 102–138.)

## Phase and Amplitude Stabilization System of Cavity Electric Field for HIRFL

LI Qiang<sup>1, 1)</sup>, LIN Xinglong<sup>1</sup>, XU Zhe<sup>2</sup>, WANG Chunxiao<sup>2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, CI Guohui<sup>1</sup>, GAO Yihai<sup>2</sup>

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The phase and amplitude stabilization system of high-frequency voltage on the main cyclotron SSC of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL) is introduced. The system composition, negative feedback loop design and other important aspects about the development of the system are particularly presented in this paper. Designing method of digital PLL orthogonal transformation and loop filter of phase and amplitude stabilization are introduced in detail. Control systems of SSC have been tested through a long-term stability experiments, the test method of the parasitic modulation suppression and stabilization in long term is proposed. According to the analyzing data, it shows that phase control accuracy in long term is within  $0.014^\circ$  and the amplitude deviation in long term is lower than  $1.29 \times 10^{-4}$ . Compared with the traditional system, its capability and target is much better.

**Key words:** phase stabilization; amplitude stabilization; loop design; long term stability; parasitic modulation suppression

Received date: 9 Jan. 2013; Revised date: 19 Mar. 2013

1) E-mail: liq\_54@qq.com

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