

# SSRF 高频低电平系统预制研究

王 芳<sup>1</sup> 王光伟<sup>2</sup>

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 上海同步辐射装置 (SSRF) 预研阶段完成了一套 500 MHz 高频系统的低电平控制系统, 它主要由信号源、速调管的激励控制、三个反馈控制环路和连锁保护构成。本文重点介绍三个反馈环路的设计、测量和调试结果。

**关键词** 低电平, 反馈, 控制环路

**中图分类号** TL503.6

高频腔控制系统的稳定性是加速器设计中的一项重要指标, 在高流强条件下对稳定性提出了更高的要求。使腔的频率正确调谐, 各腔电压的相位一致, 保持各腔相位稳定在  $\pm 1^\circ$  和幅度稳定度 1%, 是低电平系统的任务。

## 1 介绍

上海同步辐射装置 (SSRF) 储存环 (预研阶段) 的每套高频系统包括谐振加速腔、高功率源、低电平控制和连锁保护 (见图 1)。由参考信号源 (HP4437B 合成器) 产生 500 MHz 高频信号通过 30 dB 放大器、机械移相器、电控移相器和电控衰

减器等提供 180 W 速调管的激励电平, 电控衰减器和快速高频开关用来控制速调管的激励。

为了保持加速电压和相位稳定不变, 每个加速腔都有自己的调谐环路和腔体的幅度和相位环路。低电平三个环路的设计重点解决了高精度鉴相、环路滤波校正、脉冲前沿及抖动等技术难点。根据高频腔相关的时间常数和品质因数, 设计了环路反馈和滤波校正网络的详细参数。测试和同 180 kW 功率源、500 MHz 高频加速腔的高功率联调表明, 三个环路的设计是合理的, 频率调谐环路能保证腔体的调谐精度在 150 Hz 以内, 幅度环路保持腔体电压稳定在 1%, 相位环路在一定范围的输出功率内能保持加速相位稳定度为  $\pm 1^\circ$ , 满足工程的要求。

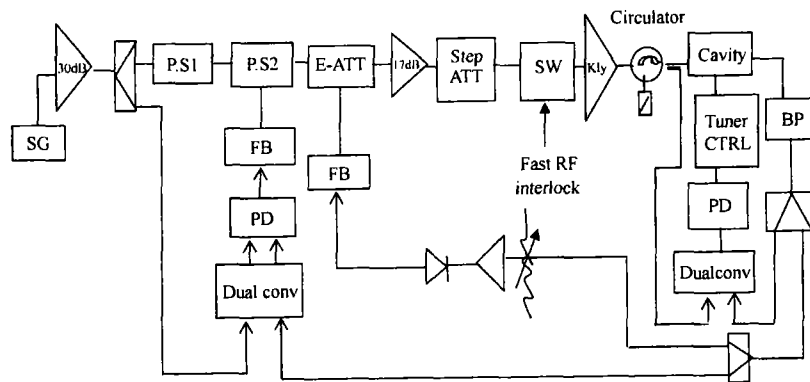


图 1 高频低电平系统框图

Fig.1 Block diagram of low level RF system

## 2 频率调谐环路

每一个腔有一个频率调谐环路, 它将弥补相位漂移和腔内的扰动, 保持高频腔在所希望的调谐频

率, 失谐相位差的误差不超过  $1^\circ$ 。由于本方案的实现和相位环路基本一样, 比如: 本振信号源、下变频转换器、1 MHz 鉴相器和相环一样, 故关键指标的性能将在相位环路叙述。由腔的温度改变引起的

第一作者: 王 芳, 女, 1954 年出生, 1987 年毕业于西安科技大学  
收稿日期: 2002-08-13, 修回日期: 2003-09-13

失谐是 8 kHz/°C, 温度改变大约为 15°C, 所以这部分的失谐将在 90 kHz 以内。由束流负载引起的腔体频率及失谐相角变化为:

$$\Delta f = \frac{I_b R_s f_{RF}}{2Q_0 V_c} \sin \Phi_s$$

$$\tan \psi = \frac{2Q_0 \Delta f}{(1 + \beta) f_{RF}}$$

对应于 SSRF 储存环,  $Q_0=44906$ ,  $R_s=6.6 \text{ M}\Omega$ ,  $f_{RF}=499.65 \text{ MHz}$ ,  $\Phi_s=165.5^\circ$ ,  $\Delta f$  是失谐频率,  $\psi$  是失谐相位角。

根据以上提到的所有的失谐条件, 调谐器控制系统覆盖 50 kHz 失谐频率范围, 或失谐相角 115°。

腔的调谐回路是以腔的馈入信号和腔内探测器信号的差作为激励信号, 经过下变频, 由 1 MHz 鉴相器进行鉴相后, 由可编程控制器 (PLC) 经电机驱动器的功率放大后驱动交流伺服电机, 来带动调谐活塞进出高频腔体, 使腔体保持在调谐位置上。

由带通滤波器、机械移相器、下变频转换器、1 MHz 鉴相器、可编程控制器 (PLC)、交流伺服电机等组成一个调谐环路, 见图 2 所示。

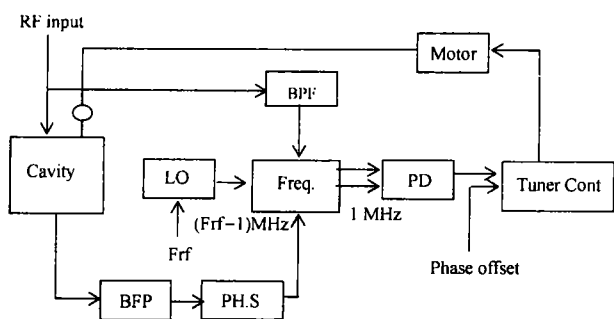


图 2 频率调谐原理图

Fig.2 Block diagram of tune phase servo loop

鉴相器的鉴相范围是  $\pm 180^\circ$ , 它的动态范围大约是 50 dB。环路的增益为 23 dB, 时间常数将是  $\tau=70 \text{ ms}$ , 在此时间内调谐误差在  $1^\circ$  以内。

### 3 相位控制环路

在高功率条件下, 将相位误差控制在  $\pm 1^\circ$  之内, 这对鉴相提出了更高的要求。鉴相器有两种形式: 一是模拟乘法器, 即正弦鉴相:

$$V_o = K_{PD} \sin(\theta_{in} - \theta_{out} + 90^\circ) \quad -\pi/2 < \theta_e < \pi/2$$

二是数字鉴相:

$$V_o = K_{PD} (\theta_{in} - \theta_{out}) \quad -\pi < \theta_e < \pi$$

为了避免在高频段由于分布参数引入的误差而给高频带来调整的困难, 我们考虑了后者。它是一种将鉴相频率先于信号源频率进行差频, 将实际鉴相的频率降低到 1MHz, 使得调整更加灵活以方便测量。

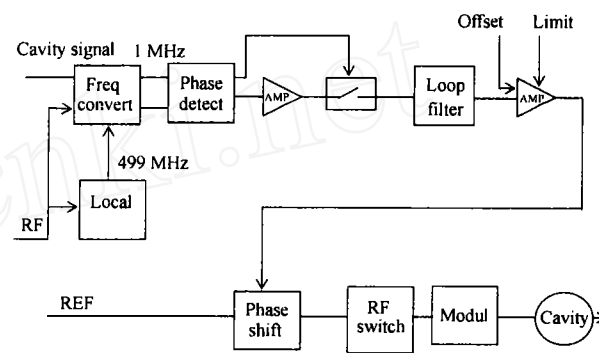


图 3 相位环路原理框图

Fig.3 Block diagram of the phase loop

环路由 1 MHz 鉴相器、 $(f_{rf} - 1) \text{ MHz}$  本振信号源、放大器、移相器、衰减器、反馈控制器等构成 (见图 3)。在环路设计中采用了相位超前校正因子, 使得环路更趋于稳定。完成设计后, 对环路的关键部件 1 MHz 鉴相器进行研制, 解决关键技术后进行实验, 然后再正式加工。设计的鉴相灵敏度为  $50 \text{ mV}/(^\circ)$ , 鉴相范围为  $\pm 180^\circ$ 。

### 4 幅度控制环路

在幅度控制环路中, 高频系统开环时, 束流将会在腔上引入与正常工作腔压可比的场, 当流强从低升到高时, 束流要从腔得到更多功率, 而腔自身消耗的功率保持不变, 这就要求高频幅度控制发挥作用, 满足束流和腔功率的要求 (见图 4)。从这一观点出发, 环路反馈部件考虑了可调输入电压幅值, 用来控制输入功率和幅度反馈的极限, 并考虑用计算机进行环路的开环和闭环。

环路包括可变衰减器、放大器、线性检波器、反馈控制器等。线性检波器考虑了温度变化的因素,

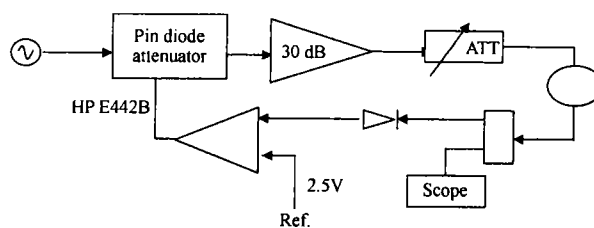


图 4 幅度控制环路原理图

Fig.4 Block diagram of amplitude loop for cavity

选择带有温度补偿，以减少检波器自身受温度影响而引起幅度变化。在部件参数确定后，完成了环路的设计。在研制过程中，对反馈控制器进行重点设计和加工调试，得到一些重要的数据，环路整个增益为 60 dB，其中直流增益为 20 dB，输出电压为 ±10 V 设置了相位补偿用的环路滤波旋钮以方便调节环路参数，输出信号设有幅度为 ±10 V 限幅器，检测端能够检测所有的输入输出信号，输出信号能够用一个外部信号进行 ON/OFF 控制。环路开闭环图形如图 5。

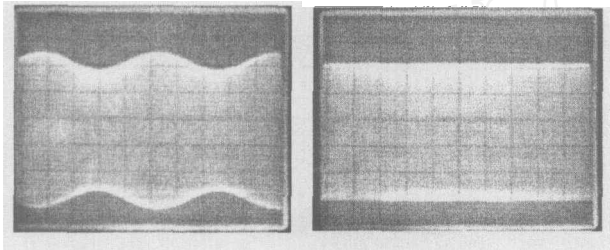


图 5 幅度环路开闭环图形

Fig.5 Figure of amplitude loop ON/OFF

### 5 调试测试结果

在对三个环路的每个部件调试测量的结果上，分别进行单独环路开环调试，完成后再进行单独闭环实验。在相位环路闭环成功的基础上，将幅度环路加入，两个环路联环实验，参数相互配合，反复调试，直至满足要求。最后将频率调谐环路加入，将其它两个环路开环，寻找腔体的调谐位置，然后闭环。再将其余两个环路分别闭环，整个联调即告成功。8 h 相位幅度长期稳定度测试见图 6(图中“1”表示幅度，“2”表示相位。)，测试参数见表 4。

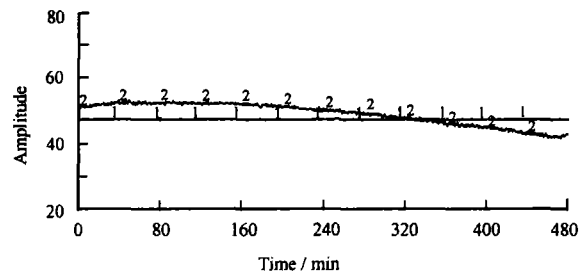


图 6 幅度相位长期稳定度测试图

Fig.6 Stability test for amplitude and phase

表 4 频率、幅度、相位环路设计指标和实测数据

Table 4 Design and measured data of frequency, amplitude and phase loop

项目名称 Item	设计指标 Design parameter			实测数据 Measure data		
	控制精度 Precision	动态范围 Dynamic range	动态响应 Dynamic response	控制精度 Precision	动态范围 Dynamic range	动态响应 Dynamic response
频率调谐环路 Frequency loop	~150Hz (可调 Volatile)	±30° (捕捉范围 Taking range)	> 5 kHz/s (调谐速度 Tuning speed)	~150Hz (可调 Volatile)	±30° (捕捉范围 Taking range)	> 5 kHz/s (调谐速度 Tuning speed)
幅度控制环路 Amplitude loop	1%	±30° (相位 Phase) 10 dB (功率 Power)	< 20 ms (20% 阶跃误差 恢复时间 20% step error resuming time)	1%	±30° (相位 Phase) 10 dB (功率 Power)	< 10 ms (100% 阶跃误差 恢复时间 100% step error resuming time)
相位控制环路 Phase loop	±1°		< 20 ms (±20° 阶跃误差 恢复时间 ±20° step error resuming time)	< 0.5°		< 10 ms (±20° 阶跃误差 恢复时间 ±20° step error resuming time)

## 6 预研结论

500MHz 高频低电平控制系统装置见图 7。

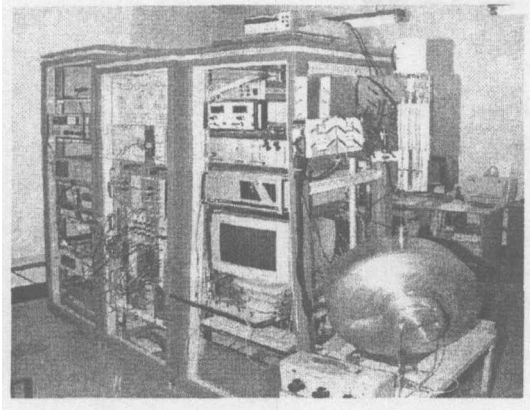


图 7 低电平控制系统装置图

Fig.7 Plant of the low level control system

低电平控制的相位、幅度及频率调谐环路和 180 kW 功率源、高频腔等成功地实现了联调测试, 低电平的性能达到或优于预定的技术指标。

**致谢** 此工作得到了中国科学院上海应用物理研究所高频组全体同志的大力支持和协助, 在此表示衷心的感谢。特别感谢陈明研究员对此稿件给予的认真修改和建议。

### 参考文献

- 1 上海同步辐射装置工程总体设计报告, 1996 年 9 月  
Shanghai Synchrotron Radiation Facility Collectivity Design Report, Sept 1996
- 2 KEK B-Factory Design Report, KEK Report 95-7
- 3 Hara M, Ego H, Kawashima Y, *et al.* RF stations of the spring-8 storage ring, PAC 97
- 4 Fabrisetal A. Characterisation of the Low Level System of the ELETTRA RF plants, EPAC96 Sitges, Jun 1996

## Low level RF control system for SSRF

WANG Fang<sup>1</sup> WANG Guangwei<sup>2</sup>

1 ( *Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800* )

2 ( *Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039* )

**Abstract** One set of low level control system was developed in the R&D stage of SSRF. It consists of a 500MHz signal generator, three feedback loops, an interlock and a protection system. This paper describes the design, commissioning and measurement results of this system, placing emphasis on the three feedback loops.

**Key words** Low level, Feedback, Control loop

CLC TL503.6