

# 高频环行器打火原因的分析\*

黄贵荣<sup>1)</sup> 高辉 刘功发 尚雷 王金祥 冯兰林

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 合肥光源(HLS)储存环高频系统环行器在工作中出现了两种形式的打火——谐波打火和束流丢失打火. 谐波打火的原因已经找到并予以解决, 但丢失束流的机制尚未明确. 文中描述了丢失束流后高频系统的响应过程, 分析了一些可能造成环行器打火的因素. 为了防止环行器打火受损, 建立了快速联锁保护电路, 该电路在历次打火中成功地保护了环行器.

**关键词** 高频系统 环行器 高频打火 联锁保护

## 1 引言

在储存环高频系统中, 环行器被用来隔离发射机和高频腔, 使束流与高频腔的相互作用不受发射机阻抗特性的影响, 同时也消除了高频腔反射对发射机稳定工作的干扰. 高频打火是环行器工作中的常见现象, 严重打火会造成环行器损坏. 本文从环行器的工作原理出发, 分析了环行器打火的一些现象和可能原因.

任意相位全反射). 图2是环行器在系统中的连接示意, 图3显示了它的附属设备.

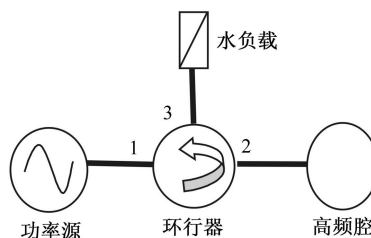


图 2 高频系统结构简图

## 2 环行器打火现象和原因分析

### 2.1 环行器的工作特性与打火的关系

合肥光源(HLS)储存环高频系统当前使用的是德国 AFT 公司制作的环行器(图1). 该环行器的设计承受连续波功率为 25kW, 实测 20kW 工作正常(端口 2

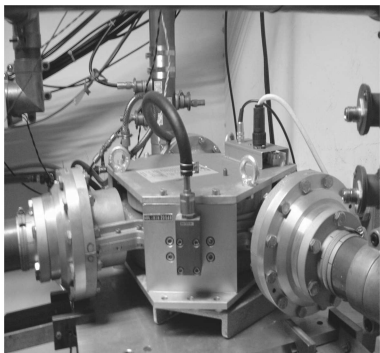


图 1 AFT 环行器外观

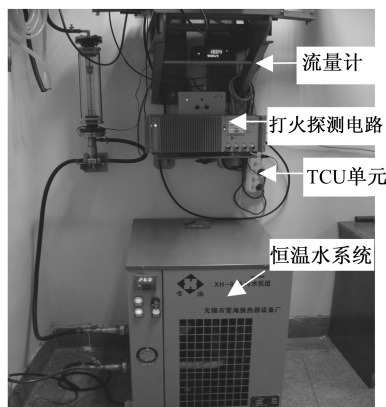


图 3 环行器附属设备一览

环行器的环行特征是由铁氧体材料在外加磁场作用下, 对通过的高频电磁场具有各向异性决定的. 其

2005 - 04 - 28 收稿

\* 国家计委九五重大科学工程项目“国家同步辐射实验室二期工程”资助

1) E-mail: grhuang@ustc.edu.cn

原理在微波器件方面的著作中有专门介绍<sup>[1]</sup>, 本文不赘述, 只提出对环行器工作最重要的一点: 要实现理想的各向异性, 铁氧体必须饱和和磁化, 而饱和点与温度有关. 此外大功率环行器的磁场源都采用永磁铁加可调电磁铁, 其中永磁铁的磁场强度与绝对温度有关. AFT 环行器的技术说明书<sup>[2]</sup>列出了 4 个温度因素: 1) 绝对温度; 2) 冷却水的入口温度; 3) 水流量; 4) 铁氧体消耗的高频功率. 为了补偿温度效应, 该环行器配有温度补偿单元(TCU), 自动调整电磁铁的电流值, 保持铁氧体的饱和和磁化状态. TCU 有 3 个温度探头, 分别测量入水温度( $T_{in}$ )、出水温度( $T_{out}$ )和永磁铁的绝对温度( $T_{amb}$ ).  $T_{out} - T_{in} = \Delta T$  表征铁氧体消耗的高频功率. 由此产生 4 个调节因子:  $T_{in}$ ,  $\Delta T$ ,  $Amb$  和  $Bias$ ,  $Bias$  是初始偏置电流.  $T_{in}$ ,  $Amb$  和  $Bias$  由厂家根据我们提供的工作环境参数在出厂前调定. 然后在工作现场的水电及环境温度稳定之后, 依据高频测量仪器(网络分析仪和功率计)的测量结果, 调定  $\Delta T$  的最佳值, 环行器方可投入运行. 调整好的 TCU 的补偿范围见表 1, 可以看出范围相当大, 环行器在工作中能够自适应环境的动态变化. 但是  $T_{in}$ ,  $Amb$  和  $Bias$  的整定很复杂, 并且一定要在特定的环境下完成. 如果在使用中不慎改变了其中两个, 而又不知道旋钮的初始位置, 不返厂重调, 在本地解决问题非常困难. 当环行器的温度补偿不正确, 其性能将降低. 可能出现的问题有: 端口隔离度下降、可承受的高频功率降低、端口反射增大.

表 1 TCU 补偿范围

入水温度 $T_{in}/(^{\circ}\text{C})$	水流量 (%)	高频功率 (%)	绝对温度 $T_{amb}/^{\circ}\text{C}$
+10	$\pm 30$	0—100	20—45

根据上述分析, 环行器的附属设备 TCU 和冷却水可以引起打火的故障有:

1) 冷却水温度  $T_{in}$  偏高或偏低. 为此我们专门为环行器配置了一套恒温水系统, 使  $T_{in}$  控制在  $(25 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ , 其流量也相对稳定.

2) 水流量太小甚至断水, 这是非常危险的, 必须对此进行连锁保护.

3) TCU 调整不正确, 使其对温度变化未能正确补偿.

4) TCU 发生故障, 如电路或探头出现问题.

TCU 存在 3—5s 的补偿延时, 而冷却水和环境温度的变化缓慢, 延时不会有任何影响. 但当传输功率发生大的突变, 铁氧体的温度变化很快, AFT 环行器的技术说明书指出环行器的性能在短期内会有一些程

度的下降, 反射会增大, 并且由于隔离度的下降, 端口间的耦合加大, 这种耦合也可以等同为反射. 另外环行器工作频带较窄, 可以看作是一个反射式的带通滤波器, 发射机输出信号中的高次谐波不能通过环行器, 几乎全部反射回去.

## 2.2 发射机的阻抗特性

合肥光源储存环高频功率源的末级采用的是真空四极管放大器, 最大输出 25kW, 工作时最大功率限制在 10kW 左右.

四极管放大器的阻抗特性很复杂, 其输出功率和激励电平大小以及发射机的调谐状态有关, 而且还和所带负载的特性有关<sup>[3]</sup>. 为了获得理想的效率和高的输出, 发射机在高功率段一般工作在乙类甚至丙类. 此时发射机表现出很强的非线性, 一般认为在输出参考面上, 发射机为高阻态<sup>[4]</sup>, 阻值大小取决于发射机的非线性程度.

如果传输线终端负载的阻抗可调变, 就可以检验四极管放大器的阻抗特性. 因为插入了环行器, 从源或高频腔看对方都是匹配的, 我们的高频系统无法做这种实验. 图 4 引用了 BEPC(北京正负电子对撞机)与发射机直接相连的高频腔功率  $P_c$  与频率的关系<sup>[5]</sup>, 同时标出了 HLS 的情况作为对比. 图中横坐标的零点是腔的谐振点,  $\Delta f$  是相对于谐振点的频偏. 由于腔的  $Q$  值很高, 只要很小的  $\Delta f$ , 就可以使腔严重失谐, 反射极大. 如果源是匹配的, 腔获得的功率将迅速降低(HLS 的情况). BEPC 的情况是: 失谐的一个方向功率下降, 但相反方向功率反而上升. 文献[5]还指出, BEPC 虚线的情况会导致束腔相互作用不稳定, 把传输线延长 540mm(大约 1/3 波长), 就转变成实线对应的稳定情况.

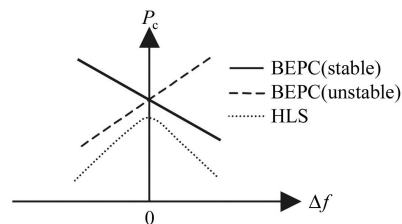


图 4 高频腔功率与频率偏移的关系

从图 4 可得到: 1) 源阻抗很高, 否则腔功率增长方向会很快出现极值, 在该方向上, 源看到的负载阻抗也是高阻, 当两者相等, 负载功率达到极值(文献[5]中未记录频偏数据, 我们曾与 BEPC 高频组同行联系, 希望做一次详细实验. 但恰逢 BEPC 改造, 发射机已于 2004 年年初全部拆除); 2) 与传输线不匹配的负载

获得高功率, 将导致线上驻波极大(考虑腔的反射程度, 在腔功率上升方向 $\Delta f$ 较大时, 传输线上驻波很强). 而源的净输出功率等于负载消耗的功率, 所以等效的物理图像是传输线构成了驻波谐振腔. 把这种状态称之为谐振态, 与之对立的为阻尼态. 这两种状态线长相差 $\lambda/4$ .

### 2.3 谐波谐振引起的打火

由于环形器对谐波大反射, 如果传输线长度合适, 谐振将在线上建立. 作为端面之一, 环形器要承受驻波电压或电流. 但发射机正常工作时谐波很小, 与基波相比, 2、3次谐波均在 $-40\text{dB}$ 以下, 即使谐振态出现, 环形器也不会有任何危险. 2003年5月, 在高频系统调试过程中, 发射机出现故障, 输出了很高的谐波, 环形器发生打火. 由于快速保护系统还没有投入, 功率源没有立即切断使打火终止, 导致了环形器损坏. 而此时发射机输出总功率还不到 $5\text{kW}$ .

事故发生后, 将发射机接在水负载上测量, 发现2,3次谐波非常高, 接近基波水平(由于当时立即关机检修, 未记录准确数据), 也就是说, 在总功率中谐波占有很大的比例. 发射机故障的原因是多方面的, 在彻底检修中发现的问题有: 腔体调谐不佳; 放大链存在级间回馈; 帘栅电路有故障等等. 解决了这些问题之后, 发射机恢复正常, 接水负载测量, 谐波达到指标. 将发射机接入系统, 测得发射机与环形器之间传输线2,3次谐波谐振单向功率增益分别为9和 $13\text{dB}$ (见表2), 2,3次谐波同时增长非常偶然. 这说明: 环形器谐波驻波打火是因为两个因素——发射机输出谐波太高和传输线谐波谐振增益较高同时存在造成的.

表 2 2,3次(408MHz, 612MHz)谐波的相对强度(基波功率 $20\text{kW}$ )

	接水负载	接环形器	馈线延长 $88\text{cm}$
2 <sup>nd</sup> / $-\text{dB}$	46	37( $\Delta = 9$ )	45
3 <sup>th</sup> / $-\text{dB}$	44	31( $\Delta = 13$ )	40

为了防范谐波打火, 将发射机至环形器的传输线延长了 $88\text{cm}$ 左右(2次谐波增加了接近 $5\lambda/4$ , 3次 $7\lambda/4$ ), 使发射机看到的环形器的谐波阻抗转为低阻, 传输线上谐波降低至正常水平(表2), 注意表中数值是驻波的单向功率, 纯行波已经远小于接匹配负载的值. 这样即使发射机调成高谐波状态, 环形器也不会看到高谐波输出.

由于打火发生时发射机输出总功率很低, 谐波行波总功率估计最多只有 $1\text{kW}$ , 对于一个可承受功率很高的环形器, 单由谐波驻波(约 $10\text{kW}$ )引起打火可能性不大. 经过仔细研究, 发现在打火之前, TCU的调节旋

钮被误动, 环形器的工作状态不正常, 承受能力下降是环形器打火的内因, 其教训非常深刻.

### 2.4 束流丢失引起的打火

为了提供较强的同步光, 当束流流强降低至一定水平(如 $100\text{mA}$ ), 储存环要重新注入. 合肥光源储存环不是满能量注入环, 注入前先去束. 但是去束后偶尔环形器会立即打火, 这种现象始终没有得到完全解释和彻底解决. 虽然发生的次数很少, 自2003年10月环形器投入工作后, 出现了近10次, 但最近2个月发生了3次, 提醒我们必须重视该问题.

去束的常用方法是降低高频腔腔压(但为了环路工作的安全不允许降得太低), 束流发生Robinson不稳定而集体丢失. 丢束过程非常短暂, 和环形器温度补偿延时相比, 可以认为是一瞬间. 为了补偿束流在高频腔中的负载效应, 高频腔必须依据束流的大小进行失谐<sup>[6]</sup>. 所以束流突然丢失以后, 高频腔大反射(首先是腔储能释放的瞬态大反射, 而后反射接近入射), 进入高频腔的功率很少, 腔压很低. 高频腔腔压幅度控制环路为了维持腔压, 会加大发射机输出, 随着频控环恢复高频腔的调谐(需要几秒时间), 发射机输出逐渐下降.  $100\text{mA}$ 去束足以将发射机推至极限. 为了保证系统安全, 我们限制了发射机的激励功率, 使发射机最高输出 $10\text{kW}$ 左右. 幅控环带宽约 $500\text{Hz}$ , 功率上升时间 $2\text{ms}$ 左右. 因此丢束以后, 通过环形器的功率瞬变相当大, 正向从 $5\text{--}6\text{kW}$ 提高到 $10\text{kW}$ , 反向则从极低的水平 $1\text{kW}$ 左右跃升到接近 $10\text{kW}$ . 环形器温度变化很大, 在温度补偿起作用之前, 环形器的性能会短期下降.

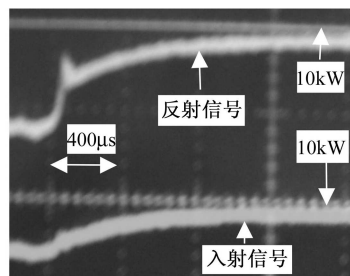


图 5 束流突然丢失后高频腔入反射功率的变化

图5显示了去束后高频系统做出的相应变化. 由于环形器稳态工作时至少可承受 $20\text{kW}$ 全反射, 打火发生在环形器调整时间内的可能性很大, 但具体原因尚不明确, 可能因素有:

- 1) 环形器性能下降太严重直接造成打火.
- 2) 功率跃升的冲击导致环形器内部偶然发生

放电。

3) 丢束后腔储能释放导致反射瞬间增强(见图4中反射信号尖峰), 超过环行器承受极限。负载瞬变时, 含有高储能元件的谐振电路会产生倍压效应, 该效应导致器件损坏是高频电路的常见故障。如果束流丢失时间极短, 可近似为阶跃函数, 经过估算反射可以达到20kW以上, 所以有理由相信反射倍增是丢束后环行器打火的原因之一。但Robinson不稳定性丢束是振荡过程, 有一定的持续时间, 这将减弱反射的最高峰值, 经过实测没有发现腔反射瞬间超过10kW以上。这也许是由于检波器的视频带宽不够(约1MHz), 平滑了尖峰信号。下一步的研究将着重解决测量系统的响应问题。

但注入阶段高流强束丢失也发生了几次打火, 归因于反射倍增就比较勉强。这时发射机输出只有600—1200W, 腔耗约400W, 瞬间反射很难达到引起环行器打火的程度。这种情况下打火可能发生在幅控环把发射机输出推到10kW之后。为了解释这一现象, 考虑了谐振打火的可能性。

4) 环行器性能下降产生的反射造成环行器1端口(环行器和发射机之间)的传输线上出现谐振, 引起环行器过载打火。有谐波打火的先例, 这种解释至少理论上是成立的。而且一次3端口水负载密封破裂事故引起的打火推断是谐振造成的。在这次事故中, 发射机输出7kW, 高频腔大失谐, 接近全反射, 水负载密封突然破裂, 水流进了馈线。这样负载端就不完全匹配, 有一部分功率返回到发射机。但水是良好的高频吸收介质, 所以终端反射不会大到全反射的地步, 并且反射是逐渐增长的, TCU来得及补偿反射功率的温度效应, 环行器自身工作正常。但随着水的不断往前流动(离环行器还远), 在整个传输线上形成谐振难以避免。大约在10s后, 环行器发生打火, 保护系统快速切断了功率源。

如果在打火时高速监测环行器各端口的功率变化, 打火的原因将一目了然, 目前的功率监测系统响应速度不够。正在研制一个触发启动、高速采集的功率监测系统。

### 3 快速保护系统

环行器发生打火后, 必须迅速切断功率源, 否则环行器面临损坏的危险。为此制作了一套快速连锁保护电路, 用于保护环行器。

连锁保护电路逻辑见图6, 图7为实物照片。基本

原理: 中央处理单元(单片机)接收保护信号, 根据预置逻辑开通或关闭RF通道。该电路今后将成为整个高频保护系统的核心部分, 除了目前投入使用的环行器打火和流量保护以外, 还准备了高频腔真空和传输线功率限幅保护通道, 并预留3路开关量输入。

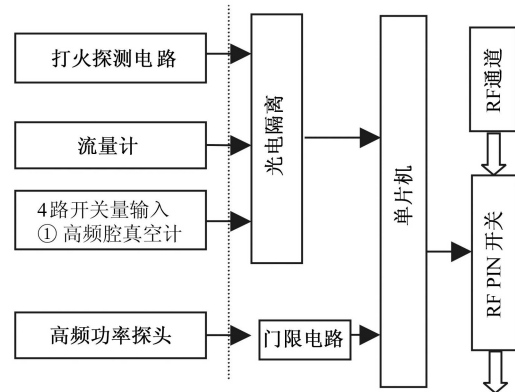


图6 连锁保护电路逻辑图

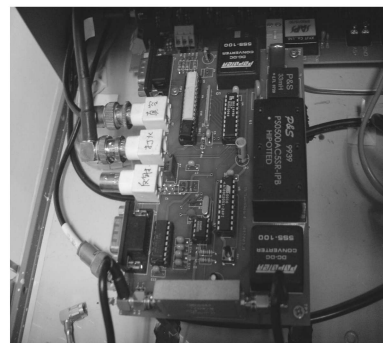


图7 连锁保护电路实物图

该电路的优点是具有处理上的灵活性。例如: 由于环行器和保护电路相距较远, 而高频机房干扰很强, 电路容易被误触发。为此把保护逻辑设为2次判断, 在一定的时间内, 保护信号出现2次, 系统才作出响应。根据环行器说明书, 打火可承受的最高能量为5J<sup>[7]</sup>, 按通过功率10kW计算, 保护响应时间应小于500μs, 设置的响应时间为150μs。事实上打火时不可能全部的高频功率被环行器吸收, 该时间延迟绰绰有余。流量保护门限为400L/h, 响应时间200ms。

超过一年半的运行证明了该系统稳定可靠, 迄今为止未发生一起误漏事故, 在将近10次的打火中, 成功地保护了环行器。

### 4 总结

合肥光源储存环高频系统环行器出现的打火现象不仅和环行器自身有关, 而且与它所处高频环境的特

性, 如发射机的工作特性以及束流丢失后高频腔的瞬态响应有很大关系. 其中谐波打火获得了比较清楚的解释, 采取的解决措施也比较成功. 由于难以进行实验模拟, 束流丢失引起打火的物理机制尚不明确, 文中提出了一些可能的解释, 该问题的彻底解决还有待

于测量系统的完善.

感谢微波高频组金凯、安宜宾、贾大春等同事对本文工作的大力支持.

### 参考文献(References)

- 1 WEI Ke-Zhu et al. New Microwave Ferrite Component. Beijing: National Defence Industry Press, 1995 (in Chinese) (魏克珠等. 微波铁氧体新器件. 北京: 国防工业出版社, 1995)
- 2 Temperature Compensating System. AFT Company(in Germany), Issue: Oct. 2000
- 3 LIU Chang-Nian et al. Radio Transmission Technique. Beijing: China Radio & TV Press, 1994. 18—37 (in Chinese) (刘长年等. 广播发送技术. 北京: 中国广播电视出版社, 1994. 18—37)
- 4 Gamp A. Servo Control of RF Cavities under Beam Loading, RF Engineering for Particle Accelerators. Exeter College, Oxford, UK, 1991, 396—411
- 5 PAN Wei-Min, SUN Yi et al. Four-Cavity Operation at BEPC. Proceedings of 1st Workshop on RF Engineering for Accelerator. Mianyang: CAEP, 2000 (in Chinese) (潘卫民, 孙毅等. 实现 BEPC 四腔稳定运行. 第一届加速器微波高频技术研讨会会议文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2000)
- 6 XU Hong-Liang et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(1): 109—112 (in Chinese) (徐宏亮等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(1): 109—112)
- 7 Arc Detector Operating Instruction. AFT Company(in Germany), Issue: Feb. 1997

## Analysis on the Arc Phenomenon of RF Circulator<sup>\*</sup>

HUANG Gui-Rong<sup>1)</sup> GAO Hui LIU Gong-Fa SHANG Lei WANG Jin-Xiang FENG Lan-Lin

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract** The characterization of the RF circulator of the Hefei Light Source is introduced. The arc phenomenon of circulator caused by RF harmonic or beam lost is analyzed in detail. In the case of the arc due to RF harmonic, the harmonic resonance on the RF transmission line has been observed from measurement. In the second case, the response of RF system to beam lost is described, and some related factors are discussed. A fast interlock circuit has been inserted into the RF system in order to protect the circulator.

**Key words** RF system, circulator, RF arc, interlock

Received 28 April 2005

<sup>\*</sup>Supported by NSRL Phase II Project

1) E-mail: grhuang@ustc.edu.cn