

BEPC II 高频系统的建造

王光伟¹⁾ 沙鹏 潘卫民 孙毅 李中泉 刘熔 黄彤明 曾日华 赵光远
黄泓 许玉芬 马强 林海英 徐波 王群耀

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 北京正负电子对撞机二期(BEPC II)的高频系统已于2006年11月投入运行,它包括了3个子系统:超导腔、发射机和低电平控制系统.与以前的高频系统相比,工作频率由200MHz变为499.8MHz,超导腔取代了常温腔.在过去一年的运行中,高频系统表现良好,达到了设计指标.

关键词 超导腔 发射机 低电平 频率 反馈

1 引言

BEPC升级改造项目(BEPC II)开始于2003年初,其中高频系统进行了全面的更新.新系统的主要技术特点是采用500MHz工作频率和超导高频腔.整个高频系统包括两套独立的子系统,正电子环和负电子环各一套.每个子系统由超导腔,250kW速调管发射机,低电平线路组成.系统的建造工作已于2006年11月完成,表1是系统的主要参数.

表1 高频系统的主要参数

对撞模式RF 系统的运行参数 (电子环和正电子环)		同步光源 运行模式RF 系统的参数	
参数	数值	参数	数值
频率	499.8MHz	频率	499.8MHz
腔压	1.5MV	腔压	2.0MV
能量损失/圈	135keV	能量损失/圈	336keV
流强	910mA	流强	250mA
束流功率	123kW	束流功率	84kW
同步相角	174°	同步相角	167°
加速腔数量	1只	加速腔数量	2只
速调管数量	1只	速调管数量	2只
发射机功率	250kW	发射机功率	500kW
系统稳定性			
加速电压相位稳定度	±1.0°		
加速电压振幅稳定度	±1.0%		

2 高频系统

高频系统由3个子系统:超导腔、功率源和低电平控制系统组成,下面将逐一介绍.

2.1 超导腔

世界范围内存在两种类型的性能优良的深度阻尼高阶模的500MHz的超导腔单元(CESR-C型和KEK-B型),BEPC II工程选用了后者,图1就是KEK-B的超导腔.

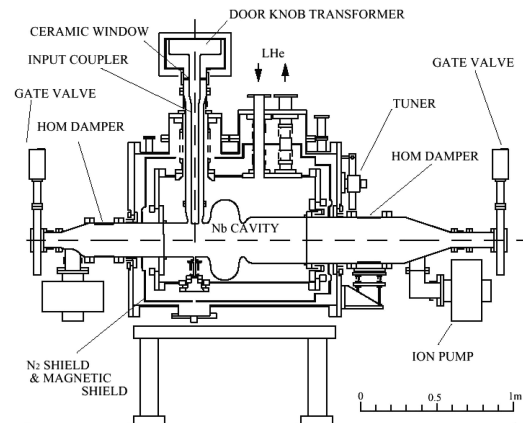


图1 KEK-B的超导腔

为了使KEK-B的508MHz超导腔的技术用于BEPC II成为可能,IHEP加速器中心高频组在KEK专家的帮助下完成了改频设计,这个设计为适应BEPC II的工作频率、束流负载和安装条件而对其局部的设计进行了修改:增加了腔子午线的直线段,减少了耦合器的长度,过渡段真空管道增加了光子吸收器,同时尽量保持了KEKB的508MHz超导腔的成熟设计.运行表明,BEPC II超导腔达到了设计的技术指标.

整个高频系统包含两个超导腔(每环一个超导腔),运行时低温系统提供所需的液氦和液氮,运行时好于压力 $\pm 3\text{mBar}$,液面高度 $\pm 1\%$ 的技术指标.除了稳定运行的工作方式,系统在超导腔的降温、升温时的速度约 $3\text{--}5\text{K/h}$.

2.2 功率源和馈送系统

2003年,根据国家大型项目招投标的有关规定对 BEPC II 高频功率源的发射机进行了世界范围的招标,法国 THALES 公司(500MHz/250kW 的速调管——TH2161A 和相应的电源)中标.两台发射机于 2004 年底和 2006 年初安装调试完毕,达到设计指标.

发射机的馈送波导将选用美国 MAGE 公司的 WR1800 波导产品,高功率环流器选用德国 AFT 公司的产品.

2.3 低电平控制系统

低电平控制子系统实现系统的反馈控制和安全连锁快速保护功能,主要由信号源,连锁保护线路和几个反馈控制回路组成,表 2 为低电平系统的主要技术指标.

表 2 低电平系统的主要技术指标

序号	项目	技术指标
1	连锁保护	响应时间 $< 10\text{ms}$.
2	相控环	环路扑捉带 $\pm 45^\circ$,恢复时间 $< 2\text{ms}$,开环增益 $> 40\text{db}$,环路放大器的带宽在 $1\text{--}10\text{kHz}$ 范围内可调,在 20db 功率的动态变化范围内,闭环反馈控制精度好于 $\pm 1^\circ$.
3	幅控环	对 50% 的阶跃误差,恢复时间 $< 2\text{ms}$,开环增益 $> 40\text{db}$,环路放大器的带宽在 $1\text{--}10\text{kHz}$ 范围内可调,在 20db 功率的动态变化范围内,闭环反馈控制精度好于 $\pm 1\%$.
4	自动调谐	环路扑捉带 $\pm 45^\circ$,调谐范围 400kHz ,调谐精度 10kHz ,带宽 $> 50\text{Hz}$
5	纵向反馈	同步振荡抑制 20db 以上.

为了使系统在 930mA 束流负载条件下运行保持足够的安全空间,采取两项措施:预失谐小角度和高频反馈.当 200mA (2.5GeV) 运行时失谐的效果不好,而 40% 的高频反馈比较有效.

3 超导腔的维护设施

根据 KEK 和 Cornell 的经验和专家的建议,认为与超导腔相配套的维护和测试设施是必要的.高能所已建成了射频超导实验室,包括大型 Class100 的洁净间,高压超纯水冲洗和铯腔表面后处理设备,垂直测试防护坑等,这些对于超导腔的维护都是十分必要的.

在工程中建造了高功率测试间,用于超导腔的验收测试和维修后的测试.高功率输入耦合器的测试台目前也在进行之中.

4 系统集成和联调

高频系统除了超导腔、功率源和低电平控制系统外,还有低温系统和其它辅助公共工程设施.系统的主要设备都是进口或委托制造的,子系统单独验收测试通过之后,工作就进展到了系统集成和联调的重要阶段.

由于在设计阶段,我们严格定义了硬件和控制信号的界面和接口,严格遵守工程规章,使得各种设备紧密配合,保证了系统一次调试成功,及时在 2006 年 12 月投入了调束运行.

5 总结

半年多的运行实践表明 BEPC II 双环高频系统基本上满足了储存环对高频系统的技术性能的要求,整个系统的设计建造是成功的.未来,将不断地努力完善系统,提高系统的可靠稳定性;同时,积累系统运行维护的经验,并以规章制度的形式确立起来.

合作与交流是发展射频超导技术的必要条件,特别感谢 KEK 专家在 BEPC II 高频系统建造过程中给予的帮助,高频组成员在 KEK 的工作也获得了运行超导高频系统的知识和实际经验,这使我们在联调和运行时获益匪浅;同时还要感谢上海光源等同行的帮助.

Construction of the BEPC II RF System

WANG Guang-Wei¹⁾ SHA Peng PAN Wei-Min SUN Yi LI Zhong-Quan LIU Rong

HUANG Tong-Ming ZENG Ri-Hua ZHAO Guang-Yuan HUANG Hong

XU Yu-Fen MA Qiang LIN Hai-Ying XU Bo WANG Qun-Yao

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The RF system for the Beijing Electron Positron Collider Upgrade (BEPC II) Project had been working since Nov, 2006. It consists of 3 subsystems including the superconducting cavity, the klystron and the low level RF system. Compared with the former RF system, the operating frequency has been changed from 200MHz to 499.8MHz, and the superconducting cavity has been used to replace the normal cavity. Up to now, the RF system performance is good and achieves the designed target.

Key words superconducting cavity, klystron, LLRF, frequency, feedback