

国内首次超导高频系统束流调试及高功率试验

孙毅¹⁾ 王光伟 潘卫民 李中泉 黄泓 马强 林海英
徐波 王群要 李少鹏 何昆 刘亚萍

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 2004—2007年BEPC高频系统从常温腔改建到超导管, 逐渐解决了改频的物理问题和超导技术的工程难题, 实现了与国际先进技术接轨, 并按期保质完成了工程、调束任务. 高频系统是BEPC II 工程首个吸收国外超导技术、自主完成集成和调试成功的大型装置; 2006年7月国内首次超导高频大功率试验成功; 2006年11月完成系统联调, 按期投入BEPC II 首轮调束; 同年12月首次投入同步辐射运行; 2007年2至5月, 东、西两套超导高频系统在1MV以上的加速电压均已实现正/负电子1.89GeV注入积累和110/114mA对撞; 在同步辐射运行中, 逐渐达到2.5GeV/250mA、束流功率100kW, 接近国外同类机器水平; 束流试验证明两套高频系统的各类参数标定和测量值与理论设计吻合. 10个月运行表明系统可靠. 本文对BEPC II 高频系统的束流联调和高功率试验做简要描述.

关键词 超导 高频系统 束流联调 首次高功率试验

1 BEPC II 超导高频系统概括

东、西两套超导高频系统²⁾ 分别安装于e⁻/e⁺ 环的外环侧, 实现正、负电子1.89GeV全能量注入、物理对撞; 也可采用一个或双腔同时运行2.5GeV同步辐射外环束流; 高频系统主要参数^[1] 见图1.

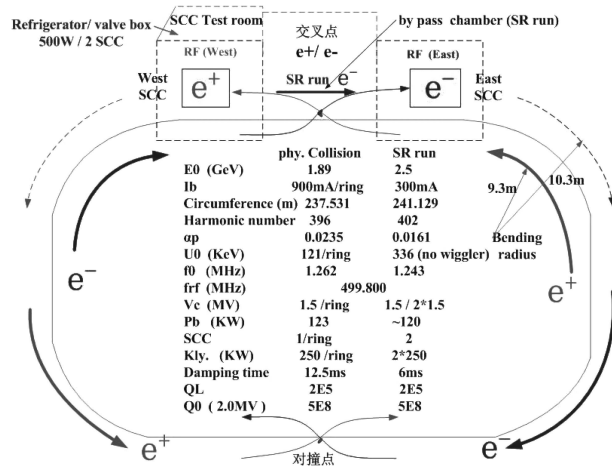


图1 BEPC II 高频系统主要参数

2005年初完成2个超导腔的垂直测试, 2006年夏完成国内首次超导腔高功率试验, 2006年11月完成东

高频系统联调, 并投入首次BEPC II 调束, 12月底同步辐射2.5GeV/100mA运行成功. 2007年2月至5月东、西两套高频系统分别实现束流1.89GeV注入积累、并完成首次e⁻114/e⁺110mA对撞试验. 2007年6月至8月东腔系统在第2轮同步辐射运行中, 逐渐达1.89GeV/500mA, 2.5GeV/250mA, 束流获得的高频功率约100kW.

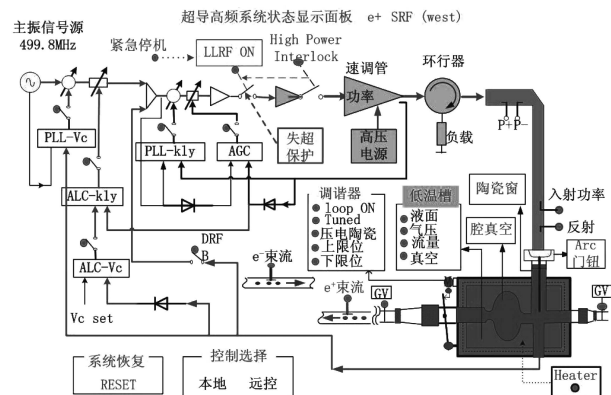


图2 一套超导高频系统组成

每套高频系统各由超导管、发射机^[2] 和低电平控制三部分构成, 如图2所示.

2008 - 01 - 07 收稿

1) E-mail: suny@ihep.ac.cn

2) BEPC II 工程设计书

2 高频系统联调过程和解决的问题

2.1 超导高频系统联调的关键步骤如下:

第一, 低电平控制与发射机联调, 在超导腔全反射下, 对发射机自动增益、幅度、相位反馈环路的闭环, 并标定高频功率等参数, 实验表明: 在150kW下, 环形器和波导传输约6%功率损耗.

第二, 常温下高频老练超导腔陶瓷窗, 采用同轴内导体加 $\pm 2\text{kV}$ 偏压的方法使窗充分排气, 避免降温后气体被超导腔所吸附.

第三, 超导腔降温中 Q_L , f_c 等测量, 由常温到4K后, 超导腔沿轴向大、小孔径两侧分别收缩约2mm和1mm, 详见表1.

表 1 东超导腔降温过程参数变化

温度/K	频率/MHz	Q_L	腔真空/Pa	LBP侧/mm
295	498.969	15187	1.9×10^{-7}	0.185
212	499.261	15190	8.8×10^{-8}	-0.75
112	499.579	24094	6.4×10^{-8}	-1.35
36	499.706	58942	5×10^{-8}	-1.7
4.9	499.722	216330	$\leq 3 \times 10^{-8}$	-1.72

第四, 超导腔频率的自动控制锁定: 要实现-3dB带宽内 $499.8\text{MHz} \pm 1.2\text{kHz}$ 自动捕捉; 还需 $\pm 50\text{kHz}$ 动态范围, 先要调节腔、补偿弹簧以及调谐器三者参数匹配.

第五, 低温下老练超导腔并标定高频电压首先调试失超保护装置, 一般1.5MV后出现失超.

采用两种不同工程方法标定超导腔高频电压: 由高频入射功率测量并计算腔压^[3]:

$$V_c \approx \sqrt{4 \times R/Q \times Q_L \times P_+}.$$

由超导腔取样电场测量并核对高频电压:

$$E_{\text{acc}} = 0.266 \times V_c = 36.72 \sqrt{P_{15D} \times Q_{15D}},$$

其中 $Q_{15D} \approx 1.13\text{E}+11$.

实测表明: 两种方法之间的误差约3%.

第六, 低电平调试腔电压幅度、相位环闭环, 保证束载下, 高频电压幅度、相位的稳定、可控.

第七, 束流调试

在测量色品和优化束流中心轨道时, 束流改变高频工作频率 $\pm 12\text{kHz}$, 试验最小步长200Hz. 调试了双腔高频相位, 实现双束物理对撞.

2.2 联调中解决的关键问题

超导腔的高频相位应由 $+90^\circ$ 到 -90° 单调下降, 东腔联调中发现相位在 -30° 开始拐向反方向, 经查证为超导腔口波导方向耦合器问题.

3 高频系统束流调试和运行结果

3.1 束流获得的高频功率

图3、图4是东腔在同步辐射运行中的典型曲线, 入射与反射功率之差为束流功率, 中间两条曲线反映束流1.89GeV注入190mA时的情形, 随后升能加速到2.5GeV后, 入射功率达77kW、反射功率降到0kW, 粗实线是束流几个小时衰减的轨迹; 由于过耦合设计($\beta_0 \approx 4000$), 无束流时, 仍需21kW高频功率维持1.27MV电压.

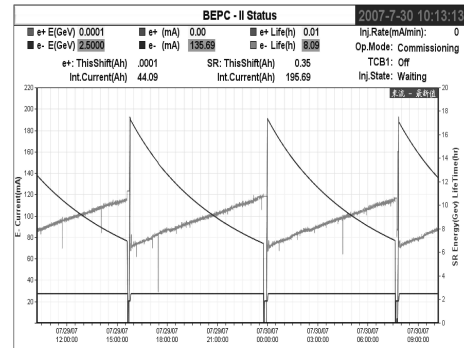


图 3 同步辐射运行束流的状态

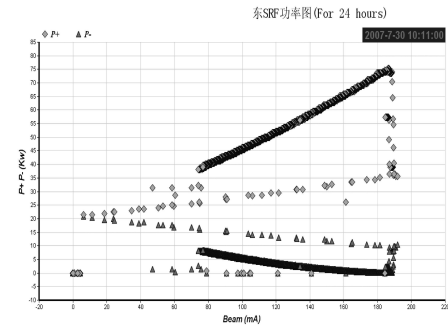


图 4 同步辐射运行中束流与高频功率的关系

3.2 束流与高频试验

在东腔1.27MV电压下, 束流由1.89升能到2.5GeV, 实测 f_s 由34.5到29.3kHz, ϕ_s 变约 13° , 考虑5个wiggler的因素, U_0 增加约50keV.

实测 e^- 环束团长度在东腔1.2MV高频电压下被压缩到约21mm.

在SR模式下, 东腔1.31MV, 注入200mA束流引起的频偏实测3.4kHz, 理论值3.6kHz.

3.3 调束中的若干问题

东腔在 e^- 环调试初期, 出现频繁真空保护和打火, 但此时若 e^- 沿同步辐射外环却可达300mA, 而西腔在 e^+ 环调试中没有类似问题.

4 国内首次超导腔高功率试验¹⁾

2006年夏, 大陆首次超导腔高功率试验成功, 高频电压达2MV, Q_0 超过 5×10^8 设计指标, 图5显示两个超导腔的测量曲线; 对价值数千万元的系统联调, 克服了腔频率锁定、失超等很多挑战。

根据一段时间内液氮消耗的能量, 测量出维持2MV 高频电压的总热耗功率 P_{total} , 导出超导腔2MV 下的实际高频功耗 P_C , 得到 Q_0 值:

$$Q_0 = \frac{V_C^2}{R/Q} \frac{1}{P_C} = \frac{V_C^2}{95.3 (P_{totalloss} - P_{staticloss} - P_{heater})}.$$

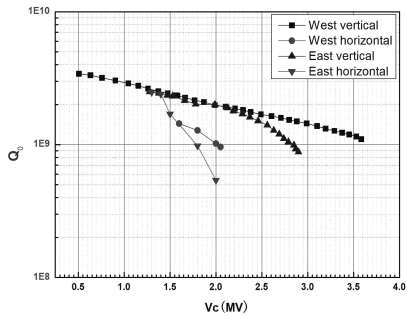


图5 国内首次高功率试验2个超导腔的 Q_0 值曲线

新腔首次老练时辐射剂量很强, 如图6所示, 经过高频老练后, 失超电压超2MV, 辐射降低。

表2 首次高功率水平测试超导腔结果

	东腔	西腔
静态漏热	30 W	27 W
$Q_0(2MV)$	5.4×10^8	1.02×10^9
$Q_0(1.8MV)$	9.8×10^8	1.28×10^9
$Q_0(1.5MV)$	1.7×10^9	1.44×10^9
Q_L	2×10^5	1.92×10^5

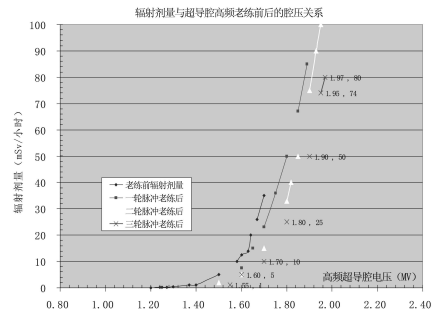


图6 辐射剂量与高频电压的关系

5 小结

BEPC II 高频系统同时跨越了改频和超导两个难点, 高频电压达1.2MV, 束长压缩到21mm、同步辐射束流功率达100kW。

感谢国内、外专家的人员培养和帮助。

参考文献(References)

- 1 ZHANG C, WANG J Q. The Beijing Electron-Positron Collider and its Second Phase Construction, Proceedings of EPAC'04
- 2 PAN Wei-Min et al. HEP & NP, 2006, **30**(3): 246 (in Chinese) (潘卫民等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(3): 246)
- 3 Padamsee H. RF Superconductivity for Accelerators

First Superconducting RF System Commissioning for BEPC II in China

SUN Yi²⁾ WANG Guang-Wei PAN Wei-Min LI Zhong-Quan HUANG Hong MA Qiang
LIN Hai-Ying XU Bo WANG Qun-Yao LI Shao-Peng HE Kun LIU Ya-Ping
(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The BEPC RF system has been changed to superconducting cavities during the last four years. In the Summer of 2006, the high power test had been successfully carried. In November, the East RF was put into commissioning. The SRF system above 1.0MV voltage has been reached with the e^+/e^- collision beam over 100mA, and the beam current improved to 2.5GeV/250mA with 100kW beam power. The beam test shows the good matching of the RF parameters with measuring value and theoretic calculation. The commissioning and the high power test will be presented in this paper.

Key words superconducting, RF system, beam commissioning, first high power test

Received 7 January 2008

1) 孙毅. 国内首次超导腔高功率试验大纲及总结报告, 2006

2) E-mail: suny@ihep.ac.cn