

BEPC II 高频发射机和环流器的调整和测试

潘卫民 王昊 赵光远 王光伟 孙毅 雷革 马强 林海英 李建国 张锦堂
(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升级改造工工程(BEPC II)将采用的频率500MHz、输出功率250kW的高频发射机和环流器已安装、调整、测试和验收完毕,这是国内建立的第一套500MHz/250kW发射机系统. 本文将详细介绍机器的调测试的原理和各项测量内容及结果,并比较设计指标和要求,来阐述此发射机的实际技术指标和测试性能.

关键词 高频发射机 环流器 调测试 技术指标和性能

1 引言

北京正负电子对撞机升级改造项目(BEPC II)关键系统——高频系统将采用500MHz工作频率取代现有的200MHz工作频率,以获得BEPC II要求的较短束长,同时也便于借鉴国际上的先进经验和技. 其设计的基本技术路线为:整个高频系统包括两套独立的子系统,即 e^+ 环和 e^- 环各有一个高频站,每套子系统由一个超导腔、一套功率源和低电平线路等构成. 其中的高频功率源将通过发射机产生高频功率,经波导传输线馈入超导高频加速腔,在腔中建立起加速电压,当电子穿越加速腔时即获得了加速动能.

表1 高频功率源主要参数

对撞模式 RF 系统的运行参数 (e^+ 环和 e^- 环)	
频率 f_{rf} /MHz	499.8
每圈能量损失 U_b /keV	135
流强 I_b /mA	910
束流功率 P_b /kW	123
速调管数量 N_K	1
发射机功率 P_{out} /(kW/Klystron)	250
同步光源运行模式 RF 系统的参数	
每圈能量损失 U_b /keV	336
流强 I_b /mA	250
束流功率 P_b /kW	84
速调管数量 N_K	2
发射机功率 P_{out} /(kW/Klystron)	250

对撞模式下BEPC II 总体设计中的束流流强为0.91A,其束耗对高频功率源提出了很高的要求,单环同步辐射功率约为110kW,计入高次模及插入件损

耗,束流总功率约为130kW,考虑到5%的传输损失和适当的功率裕度,速调管输出功率不应小于160kW^[1]. 表1给出了高频功率源的主要参数.

500MHz速调管发射机是高频功率源的关键设备, BEPC的经验表明高频系统的运行状态很大程度上决定于发射机的可靠性和稳定性.

2 高频发射机和环流器系统的技术指标及要求简述

鉴于BEPC功率源的运行经验,考虑到发射机的稳定性、可靠性和易维修性是高频系统稳定运行的重要基础, BEPC II 选择了500MHz/250kW的速调管发射机,并据此提出了BEPC II 高频功率源的性能要求和技术指标(表2和表3)及设计方案.

表2 BEPC II 高频发射机性能要求和技术指标

中心频率/MHz	499.8
3dB带宽/MHz	$> \pm 1$
幅度偏差(频偏 ± 300 kHz时)/dB	≤ 0.3
RF 功率输出(在环流器之后)/kW	250, 连续波
允许最大输出驻波比	1.1
RF 输出波导	WR1800
单一谐波的最大值(250kW 输出)/dB	≤ 30
HV 电源关断时间/ms	≤ 10
HV 电源关断后释放到速调管的能量/J	≤ 20
HV 电源电压精度(%)	≤ 1
HV 电源谐波及噪声起伏(%)	0.5PP
HV 电源寿命/h	$> 10^5$
HV 电源平均无故障运行时间/h	> 500
X 射线辐射/(μ Sv/h)	≤ 0.1
RF 辐射/(mW/cm ²)	≤ 0.1

BEPC II 选择了 500MHz/250kW 的速调管——法国 TED 公司的 TH2161A 的管子 and 相应的 PSM 电源^[1] 作为功率源的主体。

表 3 高功率环流器的技术指标和要求

中心频率/MHz	499.8
带宽/MHz	±2
类型	T/Y Junction
承受的入射功率/kW	≥250, cw
承受的反射功率/kW	≥250, cw
隔离度/dB	> 26 (在中心频率上) > 20 (在带宽内)
插入损耗/dB	< 0.1(在中心频率上) > 0.15(在带宽内)
波导连接端口	WR-1800
电子学控制	ARC 探测器, 连锁; 水流量监测和连锁; 进出水温度监测和连锁; 水压监测.
特殊要求	1. 要求环流器具备从 0 到 P_{max} (250kW) 和 P_{max} (250kW) 到 0 的快速功率处理能力. 2. 具备承受 -30dBc 高次谐波入射和反射的能力. 具备温度补偿系统、高方向性指标 (>26dB).

3 第 1 套发射机系统调测试

BEPC II 发射机历时近一年时间研制完毕. 2004 年 7 月和 2004 年 10 月至 12 月底, 进行了厂家性能指标测试和使用现场的安装、调试和性能指标的验收测试, 取得了全部的机器数据. 测试原理示意和器件衰

减定标如图 1 和图 2 所示.

在 BEPC II 500MHz/250kW 发射机的厂家和现场测试中, 主要完成了以下的测试内容, 考验了速调管及其电源的高频指标和性能参数.

1) 管子工作点

测量了输出功率为 250kW 时的阴极电压 V_k 、阴极电流 I_k 和阳极调制电压 V_a , 得 $V_k=49.5kV$, $I_k=8.2A$, $V_a=29kV$, 从而确定了速调管输出功率为 250kW 时 (实际测量得 257kW) 的管子工作点.

2) 管子的高频参量

测量了管子的高频参量, 结果如表 4 所示.

表 4 第 1 只速调管的基本参量测量结果

参量	测量值	设计值
频率/MHz	499.8	499.8
管子带宽/MHz	±1(衰减小于0.6dB)	±1(设计指标为≤1dB)
管子增益/dB	41	40
效率(%)	63	60
真空泵电流/μA	0.8	< 1

同时测量了导流系数、管体和输出腔功耗、各聚焦线圈电流、电压, 符合设计要求.

3) 各种输出功率下的管子的优化参数

测量了输出功率为 180kW, 130kW, 80kW, 40kW 的各优化点的各上述参数, 得最佳 V_k , V_a , I_k 等. 据此结果, 可随功率使用级别调整管子工作点, 在最大效率和最大增益下提供将来的 BEPC II 各级功耗要求.

4) 各输出功率与驱动功率的关系, 幅相特性, 效率等

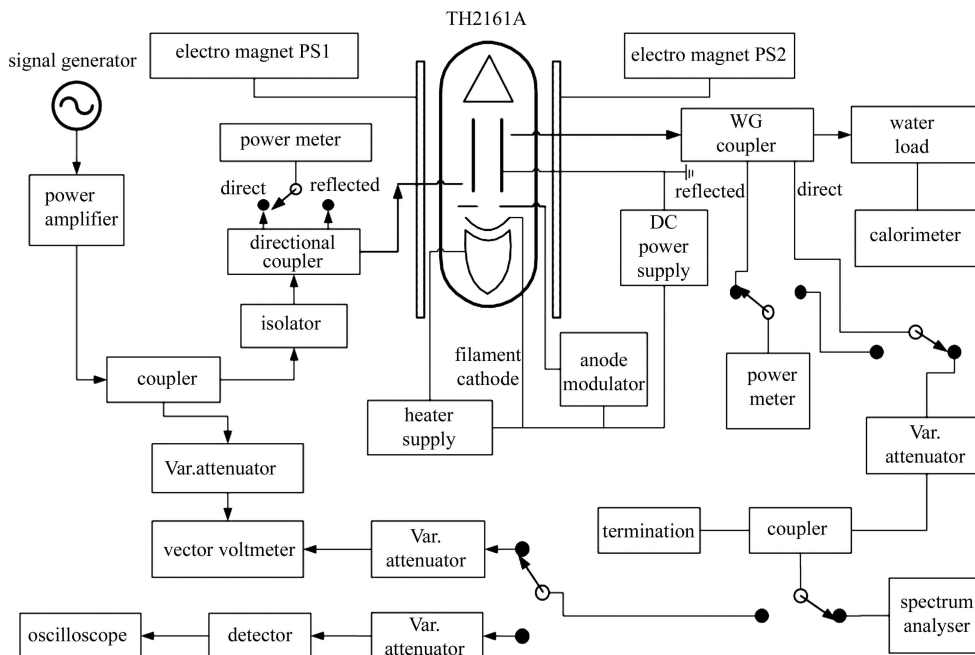


图 1 第 1 部发射机现场测试原理和接线示意图

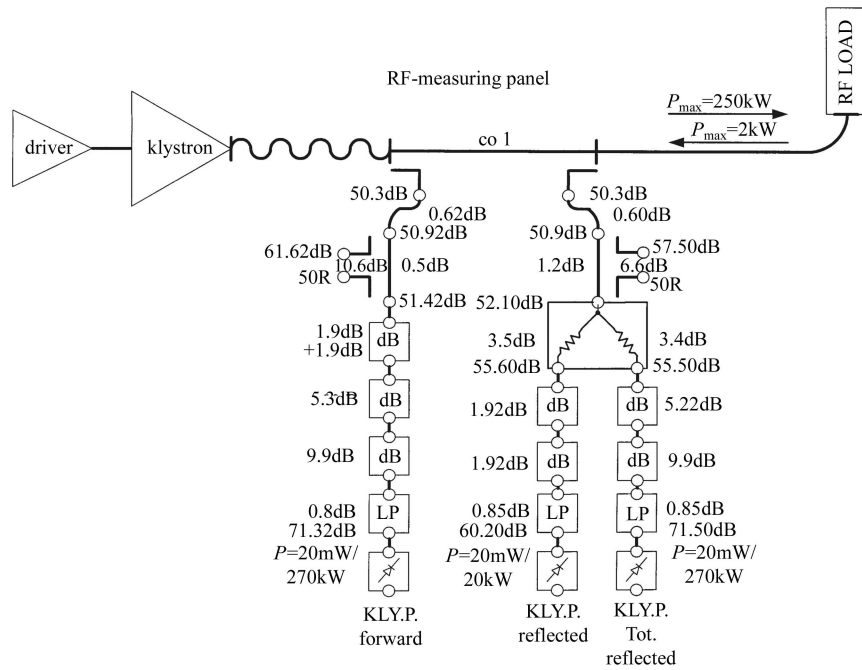


图 2 第 1 部发射机功率测量的衰减量定标

测量了 180kW, 130kW, 80kW, 40kW 输出功率与驱动功率的关系曲线, 幅相特性曲线, 效率曲线等.

从而得到: (1) 高频系统幅控环的工作点和范围(见图 3); (2) 高频系统相控环的工作范围(见图 4).

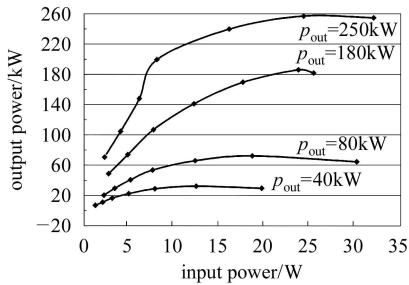


图 3 在 4 个工作点上输出功率与驱动功率的关系曲线

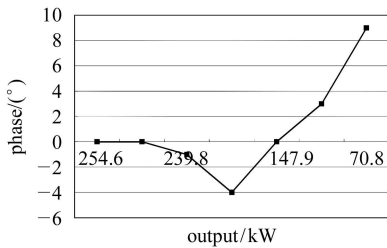


图 4 速调管幅相特性曲线

5) 测量了高频输出相位随工作点 V_k , V_a , I_k 和输出功率的变化关系, 得到不同功率曲线下的相位变化量, 由此可知相环在各功率曲线下的工作点设置(见图 5, 图 6).

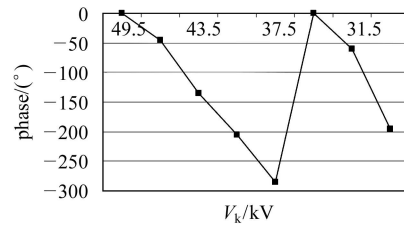


图 5 速调管输出相位随阴极电压工作点 V_k 的变化

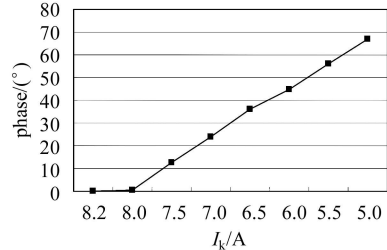


图 6 速调管输出相位随阴极电流工作点 I_k 的变化

6) 速调管子带宽内相位随频率的变化

测量了速调管子带宽内幅度随频率变化的曲线(见图 7 和图 8), 从扫频曲线来看, 管子的工作频率稍偏离最高点(即曲线不是关于工作频率对称的), 但由于我们的速调管是工作在点频上(499.8MHz), 所以, 性能和工作状态不受此影响.

7) 高次谐波的测量结果为: 二次谐波(499.8MHz×2)为 -39.66dB, 小于设计要求 -30dB; 三次谐波(499.8MHz×3)为 -61.17dB, 小于设计要求 -40dB.

8) 信噪比测量结果为 -73dBc, 小于设计要求 -70dBc.

9) 带宽内噪声为 -74dB (设计要求: $\leq -60\text{dB}$).

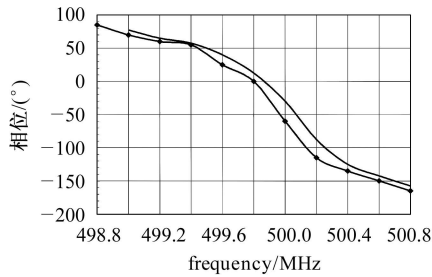


图 7 速调管子相位在带宽内的变化

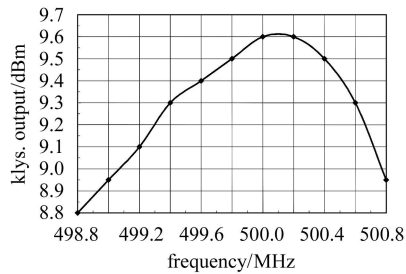


图 8 速调管管子的带宽曲线

10) X 射线辐射剂量测量结果为 $< 0.1\mu\text{Sv/h}$, 实际上只测到了本底, 符合设计要求即距离管子 1m 处 $\leq 0.1\mu\text{Sv/h}$.

11) 高频辐射为 0.06mW/cm^2 , 小于设计要求, 即距离管子 3m 处高频辐射 $\leq 0.1\text{mW/cm}^2$.

12) 测量了速调管真空度

不加 rf 输入, 管子电子束功率将全部消耗在收集极上, 此时是真空度比较差的情况. 持续 30min 后测量, 泵电流为 $0.9\mu\text{A}$, 对应真空度为 $8 \times 10^{-9}\text{torr}$ (设计要求: $\leq 1 \times 10^{-8}\text{torr}$) ($1\text{ torr} = 1.33322 \times 10^2\text{Pa}$).

13) 磁感应强度测量

在距 klystron 轴 1.5m 处, 测量结果为 0.15mT , 设计要求为 $\text{max} \leq 0.5\text{mT}$.

14) 长时间拷机

在厂家测试中, 输出功率设定在 250kW , 连续运行 24h, 检查管子真空(泵电流)和输出功率的变化. 真空稳定(泵电流小于 $1\mu\text{A}$), 输出功率稳定.

在现场测试中, 输出功率设定在 250kW , 连续不间断运行 50h, 一次成功, 速调管和电源的各项指标均符合设计要求.

15) 直流电压测试(冷阴极)

(1) 阴极/调制阳极对地电压: 50kV , 15min; 漏电流: 0.27mA (设计值 $< 2\text{mA}$);

(2) 阴极对调制阳极电压: 40kV , 15min; 漏电流: 0.25mA (设计值 $< 2\text{mA}$).

16) 运行模式

在调试机器中, 根据开机特点和超导高频腔要求, 确定和设置了发射机的以下运行模式(见表 5).

表 5 BEPC II 发射机运行模式

State No.	Modes1	Modes2,3	Modes4,5	Modes6	Modes7
0	Zero(Shutdown)	Zero(Shutdown)	Zero(Shutdown)	Zero	Zero
1	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
2	Auxiliaries On	Auxiliaries On	Auxiliaries On	One PS On	Aux On
3	Cryo.Ready	Cryo.Ready	Auxiliaries On	One PS On	Aux On
4	Standby	Standby	Standby		Standby
5	HV On	HV On	HV On		HV On
6	Beam On	Beam On	Beam On		
7	RF On	RF On	RF On		
8	Beam in ring				

总之, 第 1 部发射机安装、调试、测试及验收和发射机的配套工作已按计划全部完成, 经厂家和现场测试, 速调管和电源及其配套设施的各项测试结果达到或超过设计指标, 通过了正式验收(见图 9).



图 9 第 1 部发射机现场验收完毕

4 高功率环流器测试验收

BEPC II 高功率环流器为三端口 Y 型环流器, 工作频率为 499.8MHz , 承受的通过功率为 250kW , 为消除温度变化而造成的性能指标下降, 自身带有温度补偿单元, 能在一定温度范围内(一般 $20^\circ - 30^\circ$ 内)弥补 $\pm 5^\circ$ 的温度变化带来的参数影响.

2005 年 4 月, 我方对第 1 台用于第 1 套高功率源的高功率环流器进行了安装、测试和验收. 环流器的第 2 端口接一活塞式短路波导, 第 3 端口接水负载. 这样, 通过环流器的高功率将全部反射到第 3 端口, 消

耗在水负载上,并由环流器和水负载的温升计算出环流器的插入损耗和入、反射功率.改变短路活塞的位置,可测定不同短路相位时的环流器参数,如通过环流器的入、反射功率、插损、温升等.主要测试内容如下.

1) 测量不同短路面下入射功率为40kW, 80kW, 130kW, 180kW, 250kW下的反射功率,均小于1.01kW,满足发射机的最大反射要求.

2) 测试环流器内(即铁氧体)温升变化和温度补偿单元的反馈机制及灵敏度.

3) 测量不同短路面下,入射功率为40kW, 80kW, 130kW, 180kW, 250kW下环流器的隔离度.

4) 测量不同短路面下,入射功率为40kW, 80kW,

130kW, 180kW, 250kW下环流器的插入损耗.

上述各项测试的结果均达到设计指标,满足高功率传输和隔离要求.图10给出了上述各功率下不同短路面位置的环流器的隔离度测量结果.

5 结束语

对于BEPC II第1部发射机,已按计划完成了发射机所有厂家测试内容,完成了现场安装、各部分和整机调试、性能指标测试和验收工作;对于第1台高功率环流器(见图11),也按计划完成了所有的指标测试内容.得到的测试结果均达到或超过设计指标,满足BEPC II要求,可投入正式运行.

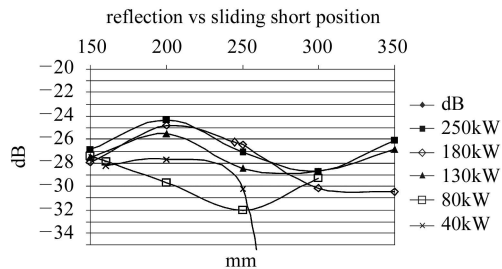


图10 不同短路面位置下环流器的反射隔离测量结果

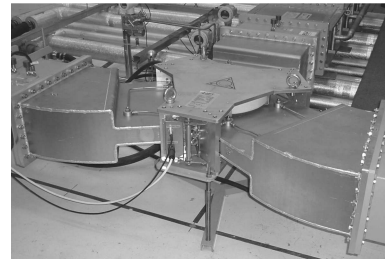


图11 第1部环流器现场验收完毕

参考文献(References)

1 PAN W M et al. HEP & NP, 2006, **30**(3): 246—250 (in

Chinese)

(潘卫民等. 高能物理与核物理, 2006, **30**(3): 246—250)

Acceptance Tests of the BEPC II RF Transmitter and the Circulator

PAN Wei-Min WANG Hao ZHAO Guang-Yuan WANG Guang-Wei SUN Yi LEI Ge
MA Qiang LIN Hai-Ying LI Jian-Guo ZHANG Jin-Tang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The high power RF transmitter and the circulator with 500MHz/250kW which will be operated in Beijing Electron-Positron Collider Upgrade (BEPC II) project have been installed on site, and adjustments and acceptance test have been finished, which is the first transmitter system of 500MHz/250kW in China. In this paper, the test principle and all measurements as well as commissioning result in the acceptance test are introduced in details, and the actual machine technical parameters and performance are presented. An acceptance test conclusion by comparing with the design requirements is given.

Key words BEPC II RF transmitter, circulator, acceptance test, technical parameters and performance