

# BEPC II 高频功率源技术要求和设计

潘卫民<sup>1)</sup> 赵光远 王昊 王光伟

(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(BEPC II)将采用频率为500MHz的高频系统取代现有的200MHz高频系统,其对撞模式的束流流强设计指标为0.91A,这对高频功率源提出了很高的要求.本文根据BEPC II总体指标和高频系统的相关技术参数,提出了其高频功率源的总体布局、技术指标和设计要求以及配套设施的设计方案,在此基础上我们已完成了第一套高频功率源的安装和调试,并通过了专项和整机的测试验收.

**关键词** 高频功率源 设计方案 布局

## 1 引言

北京正负电子对撞机升级改造项目(BEPC II)是一台双环高亮度正负电子对撞机和兼容模式下的同步光源.高频系统是BEPC II的关键系统,它的功能是通过发射机产生高频功率,经功率传输线馈入到超导高频加速腔,在腔中建立起加速电压,当电子穿越加速腔时其能量即获得了提高.现有的北京正负电子对撞机(BEPC)高频设备已不能满足BEPC II在腔压、功率和高阶模方面的要求,因此必须全面更新.新系统将采用国际上同类型加速器主流应用的500MHz工

作频率来取代现有的200MHz,以满足BEPC II所要求的更短的束长.同时将采用超导高频腔替代现有的常温腔.高频高功率源是高频系统的一个重要组成部分,除工作频率和发射机类型将改变外,发射机的功率和稳定度要求等都远远高于现有的发射机指标.表1列出了BEPC II中与高频系统相关的主要机器参数.

## 2 BEPC II 对高频系统功率源的要求

BEPC II 选择的设计运行值为1.5MV/腔,束流功率约为130kW,那么e<sup>+</sup>环和e<sup>-</sup>环各需1只超导加速腔即可.为此,高频系统设计的基本技术路线为:整个系统包括两套独立的子系统,即两个高频站,e<sup>+</sup>环和e<sup>-</sup>环各一个,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(图1).

表 1 BEPC II 中与高频系统相关的机器参数

参数	符号	单位	对撞模式 (e <sup>+</sup> 环和e <sup>-</sup> 环)	同步光模式
能量	$E$	GeV	1.89(最大2.0)	2.5
周长	$C$	m	237.5306	241.129
流强	$I_b$	mA	910	250
束长	$\sigma_z$	mm	1.5	1.2
动量压缩因子	$\alpha_p$		0.0235	0.0161
辐射损失	$U_0$	keV	121	336
寄生模损失	$U_k$	keV	~14	(依赖填充模式)
谐波数	$h$		396	402
RF频率	$f_{rf}$	MHz	499.800	
回旋频率	$f_0$	MHz	1.262	1.243
同步振荡频率	$f_s$	kHz	42.91	43.51
高频电压	$V_{rf}$	MV	1.5	3.0
纵向阻尼时间	$\tau_e$	ms	12.5	6
束流功率	$P_b$	kW	123	84(不含寄生模)

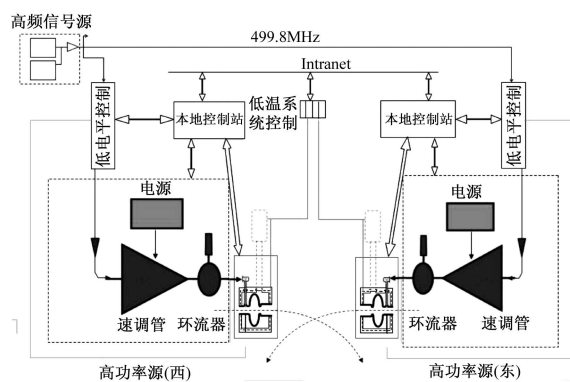


图 1 BEPC II 高频系统框图

2005 - 07 - 20 收稿

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

表2 高频系统主要参数

对撞模式 RF 系统的运行参数(e <sup>+</sup> 环和e <sup>-</sup> 环)		
参数	符号(单位)	数值
频率	$f_{rf}/\text{MHz}$	499.8
腔压	$V_c/\text{MV}$	1.5
能量损失/圈	$U_b/\text{keV}$	135
流强	$I_b/\text{mA}$	910
束流功率	$P_b/\text{kW}$	123
同步相角	$s/(\circ)$	174
加速腔数量	$N_C$	1
速调管数量	$N_K$	1
发射机功率	$P_{out}/(\text{kW}/\text{Klystron})$	250
同步光源运行模式 RF 系统的参数		
腔压	$V_c/\text{MV}$	2.0
能量损失/圈	$U_b/\text{keV}$	336
流强	$I_b/\text{mA}$	250
束流功率	$P_b/\text{kW}$	84
同步相角	$s/(\circ)$	167
加速腔数量	$N_C$	2
速调管数量	$N_K$	2
发射机功率	$P_{out}/(\text{kW}/\text{Klystron})$	250

BEPC II 总体设计对 e<sup>+</sup> 环和 e<sup>-</sup> 环的高频系统的要求的主要特征是超导加速腔和约 0.91A 的束流负载. 0.91A 的束耗对高频功率源提出了很高的要求. 总的束流功耗  $P_{\text{Total}}$  由以下几项组成

$$P_{\text{Total}} = P_{\text{SR}} + P_{\text{HOM}} + P_{\text{Wiggler}} \quad (1)$$

其中  $P_{\text{SR}}$  为束流的同步辐射损耗,  $P_{\text{HOM}}$  为束流的高次模损耗  $P_{\text{Wiggler}}$  为 Wiggler 插入件损耗.

在对撞模式下, e<sup>+</sup> 环和 e<sup>-</sup> 环的高频功率源要可分别提供约 140kW 的高频功率用于补充束耗; 在同步辐射模式下, 束流在外环运行经过两只高频腔, 两套功率源具备同时提供 500kW 功率的能力. 基于上述设计框架, 表 2 给出了高频系统的主要技术参数.

### 2.1 速调管发射机的技术指标和要求

由 BEPC II 物理要求,  $E$  为 1.89GeV,  $I$  为 0.91A, 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.

对世界各速调管生产厂家的调研结果显示, 就目前 BEPC II 的功率要求来说, 180kW 输出功率的速调管较为合适. 若考虑今后的发展, 即对束流流强或同步辐射运行模式的要求进一步提高, 就需要更多的高频功率, 则可以选择更高一级输出功率即 250kW 的管子. 另外, 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在很大程度上决定于发射机的可靠性和稳定性. BEPC II 是

一台大型科研装置, 其功率源的可靠性要求极高, 通常每年要连续工作 9 个月以上, 因此, 发射机的稳定性、可靠性和易维修性也是考虑的重要内容和选择依据. 基于上述要求, 提出如表 3 所示的 BEPC II 高频系统 500MHz 功率源性能要求和技术指标及设计方案.

表3 BEPC II 高频功率源性能要求和技术指标

1. 技术指标		
中心频率		499.8MHz
3dB 带宽		> +/- 1MHz
幅度偏差(频偏±300kHz时)		≤ 0.3dB
RF 功率输出(在环流器之后)		250kW 连续波
允许最大输出驻波比		1.1
RF 输出波导		WR1800
RF 输入阻抗		50
RF 输入连接器		N 型(female)
单一谐波的最大值(250kW 输出)		≤ -30dBc
HV 电源关断时间		≤ 10ms
HV 电源关断后释放到速调管的能量		≤ 20J
HV 电源电压精度		≤ 1%
HV 电源谐波及噪声起伏		0.5%PP
HV 电源寿命		> 10 <sup>4</sup> h
HV 电源平均无故障运行时间		> 500h
速调管保修时间		10000h
2. 电网条件		
电压		3×380V±5%, 1×220V±7%
谐波		< 5%
频率		50Hz±1%
3. 环境条件		
温度		5—40°C
湿度		≤ 95%
4. 冷却方式		
水冷和风冷(水质要求: 电导率≤ 50μS/cm; 高压电源柜内带有空气过滤装置, 连锁和控制都并入电源柜内). 发射机、水负载的冷却水的水质、水温、流量及压力要求要适应现有水冷主系统的条件		
5. 安全规范		
在变压器和电容器内不允许用聚氯联苯, 推荐使用无油的空气或环氧树脂绝缘的变压器		
X 射线辐射		≤ 0.1μSv/h
RF 辐射		≤ 0.1mW/cm <sup>2</sup>
6. 控制和状态采样		
6.1 本地		
功率源带有控制和连锁系统, 具有状态和故障指示, 连锁电平能对全部电路和电压驻波比、最大反射功率等进行快速保护, 并显示故障状态		
6.2 远程监控		
功率源将同 BEPC II 计算机控制系统联网, 经本功率源的遥控接口可以远程监控本功率源的运行状态		

发射机的选型是一项关键性的工作. 从类型上, 发射机可分为全固态发射机和速调管发射机. 从技术水平来看, 全固态发射机目前仅有较低功率的(最大约 40kW, 频率为 352MHz). 所以, 速调管发射机应是我们唯一的选择. 速调管高压电源又主要分为撬棒电

路式的传统型电源和脉冲步进调制器(PSM)型电源.前者采用的是电真空撬棒的电路,运行中容易出问题,是速调管发射机的最薄弱环节,目前世界各地实验室都尽量避免使用这种电源.所以, BEPC II 选择了后者.瑞士 TB&M 公司生产的 PSM 电源为新型固态器件电源,它是由许多模块堆积成的(如 250kW/55kV 的电源由 86 个模块组成),所有模块组件的负载是自动均衡了的;每个模块产生较低电压,运行中个别模块出现问题将不影响速调管的运行,并且更换模块十分方便;电路储能小,可不用撬棒;并且具有效率高( $\eta > 97\%$ )、功率因数高( $\cos\varphi > 95\%$ , 因为 12 $\varphi$  整流)、关断时间快( $< 10\mu\text{s}$ )、采用全数字控制系统(控制系统按照所需要的输出电压值,自动计算出需要多少个模块工作,同时,自动均衡所有模块的负荷,一旦发现个别模块失灵,即令其退出工作)等优点.另外,发射机控制采用的是 EPICS 控制,与 BEPC II 未来所采用的控制界面一致.

鉴于以上调研结果和分析, BEPC II 高频功率源的发射机最后选择了 500MHz/250kW 的速调管——法国 TED 公司的 TH2161A 和相应的 PSM 电源作为 BEPC II 功率源的主体.

另外,新发射机对水电风配套系统及发射机大厅也提出了很高的要求,原有的发射机大厅功能和水电风配套系统均不能满足其要求,需重新设计和改造.

## 2.2 环流器和波导传输线的技术指标和要求

从国内外成功和失败的经验和教训来看,用于大束流负载的高功率环流器的技术指标的选定亦至关重要,特别对于 BEPC II 这种非全能量注入的情况而言,很短的时间内通过环流器发射至腔内的高功率很大,若技术指标设计得不合理,极易造成环流器的损坏.表 4 给出了 BEPC II 功率源环流器的主要技术指标和要求.

特殊要求:

1) 由于 BEPC II 的注束效率较高,束流注入很快,并且 BEPC II 的注入器不是全能量注入,束流注到储

存环里后需升能,这要求高频功率源在很短的时间例如 1min 内提供很高的高功率给环内束流,因此,要求环流器在如此短的时间内具备从 0 到  $P_{\max}(250\text{kW})$  和  $P_{\max}(250\text{kW})$  到 0 的功率处理能力.

2) 虽然环流器的工作频率为  $(499.8 \pm 2)\text{MHz}$ ,最大连续波功率可  $\geq 250\text{kW}$ ,但同时要具备承受  $-30\text{dBc}$  高次谐波入射和反射的能力.

3) 根据 BEPC II 的注束和升能特点,对环流器的响应和温度补偿系统、环流器的方向性指标提出特殊要求,使之适应 BEPC II 要求.

表 4 高频功率源环流器的技术指标和要求

中心频率	499.8MHz
带宽	+/- 2MHz
类型	T/Y Junction
接受的入射功率	$\geq 250\text{kW}$ cw
接受的反射功率	$\geq 250\text{kW}$ cw
隔离度	$> 26\text{dB}$ (在中心频率上) $> 20\text{dB}$ (在带宽内)
插入损耗	$< 0.1\text{dB}$ (在中心频率上) $> 0.15\text{dB}$ (在带宽内)
冷却方式	水冷
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.

大功率传输线由 21 种波导器件组成,对其高频参数和技术指标亦有特殊要求.例如,根据 BEPC II 高频系统相位稳定度控制精度和功率测量精度特别要求各波导器件的驻波比均小于 1.05、方向耦合器的耦合系数分别为 50dB 和 60dB、方向性要大于 35dB.

## 3 发射机的运行模式的设计

根据不同目的和超导高频腔特点,在发射机设计中考虑了可能的运行模式,主要有单电源运行、发射机在水负载上运行、连锁低温系统运行、环内束束运行等几种状态,最终确定了以下几种运行模式(见表 5).

表 5

State No.	modes 1	modes 2,3	modes 4,5	mode 6	mode 7
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				

## 4 系统布局

北京正负电子对撞机现有东、西两个发射机大厅, BEPC II 将在其中各放一台 500MHz 的发射机. 东厅内的发射机将通过环流器和波导传输线向外环的超导高频腔馈送功率, 西厅内的发射机将不但提供功率用于西超导高频腔的运行, 还可提供功率给大功率测试间用于正在测试的超导高频腔的水平测试. 图 2 是西高频厅布局的三维示意图.

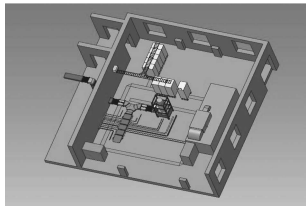


图 2 西高频功率源总体布局图

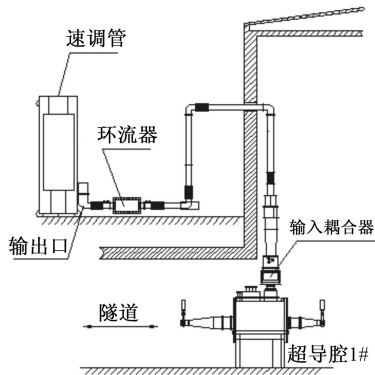


图 3 西高频功率源与超导高频腔的连接

发射机与超导高频腔的波导传输线走向设计与 BEPC 的情况完全不同, 在满足功率传输要求的前提下, 着重考虑了辐射剂量安全要求, 同时, 尽量布局简

单, 便于安装和节省资金. 图 3 为西高频功率源与超导高频腔的连接示意图.

地线布局是一个十分重要的考虑内容, 以往的经验告诉我们, 接地的正确与否直接关系到系统的抗干扰能力和输出功率的波形稳定. 高功率源系统的地线布局中心思路是: 厅内的速调管和电源为一地线分支, 低电平设备为另一分支, 但各分支皆汇入一点接地. 图 4 显示了西高频厅地线系统的布局.

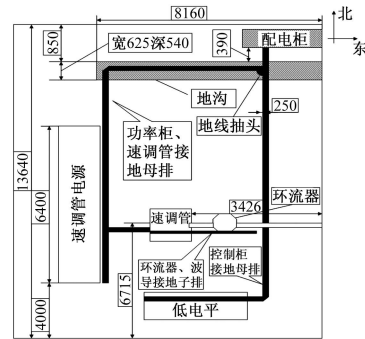


图 4 西高频厅地线系统示意图

## 5 水冷和风冷系统

新的先进的大功率高频发射机对冷却系统也提出了非常高的要求. 要求进水温度要控制在 30°C 以内, 水温变化要稳定在 ±2°C 内. 同时, 为了保证功率测定的准确性, 根据功率损耗计算公式

$$P(\text{kW}) = 4.18 \times \Delta t(^{\circ}\text{C}) \times q(\text{l}/\text{min})/60 \quad (2)$$

其中  $\Delta t(^{\circ}\text{C})$  为水温变化,  $q$  为水流量, 要求大功率负载的水温测量精度要达到 ±0.5°C, 水流量的稳定度和测量精度要高于 1%. 同时对水质也提出了较高的要求, 如水的电导率 ≥ 10kΩcm.

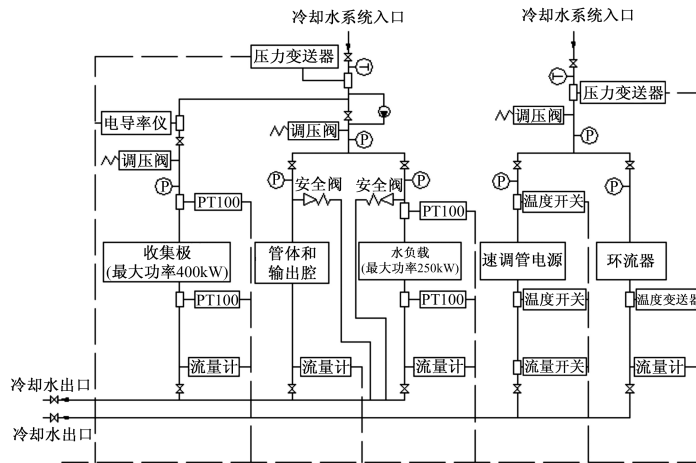


图 5 西高频功率源水冷系统示意图

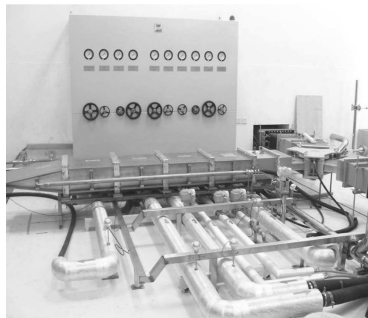


图6 西高频功率源水冷系统厅内部分

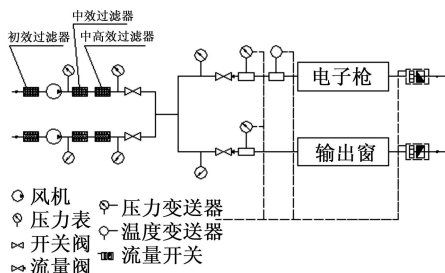


图7 西高频功率源风冷系统示意图

对于风冷系统,除风量和压力要满足要求外,纯净度也是非常重要的指标,要求98%的直径超过 $1\mu\text{m}$ 的粒子被过滤掉.图5和图7分别为西高频功率源水冷和风冷系统示意图,图6为西高频功率源水冷系统厅内部分设施.

## 6 结论

发射机的总体设计是合理并完善的,符合 BEPC II 的功率要求.按照提出的技术指标和要求,经过初步设计和最终设计评审,历时一年多时间,两套发射机和环流器已分别研制完毕,并严格按程序完成了第一套发射机的厂家和现场测试的所有工作.结果显示,速调管和电源及其配套设施的各项测试结果均达到或超过设计指标和要求,说明提出的设计参数和要求是合理的,机器的性能良好.目前,第一部发射机验收完毕,可投入正式运行,为 BEPC II 的关键环节高频系统的研制成功奠定了基础.

# Technical Requirements and Design of RF Power Source for BEPC II

PAN Wei-Min<sup>1)</sup> ZHAO Guang-Yuan WANG Hao WANG Guang-Wei

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

**Abstract** For the sake of acquiring the shorter beam bunch length a 500MHz RF system will be adopted in Beijing Electron-Positron Collider Upgrade (BEPC II) project to replace the existing 200MHz RF system. The designed beam current of BEPC II is 0.91A which put forward high requirements to the parameters of RF power source. According to the BEPC II general goals and the related requirements with RF system we completed the BEPC II RF power source layout and all technical designs including the parameters for the transmitters and the circulators, completed the designs of all auxiliary systems. Based on these designs, the first BEPC II RF power source including the transmitter and the circulator as well as the auxiliary systems have been established and passed the acceptance test.

**Key words** BEPC II RF power source, technical design and parameters, layout

Received 20 July 2005

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