

# HALF超导和常温高频腔进展

吴芳芳

2025年07月04日



**NSRL**  
National Synchrotron Radiation  
Laboratory



# 目录

## CONTENTS



01

HALF超导主高频系统介绍

02

HALF常温主高频系统介绍

03

下一步工作计划



**NSRL**  
National Synchrotron Radiation  
Laboratory

国家同步辐射实验室

# 目录

## CONTENTS



01

HALF超导主高频系统介绍

02

HALF常温主高频系统介绍

03

下一步工作计划

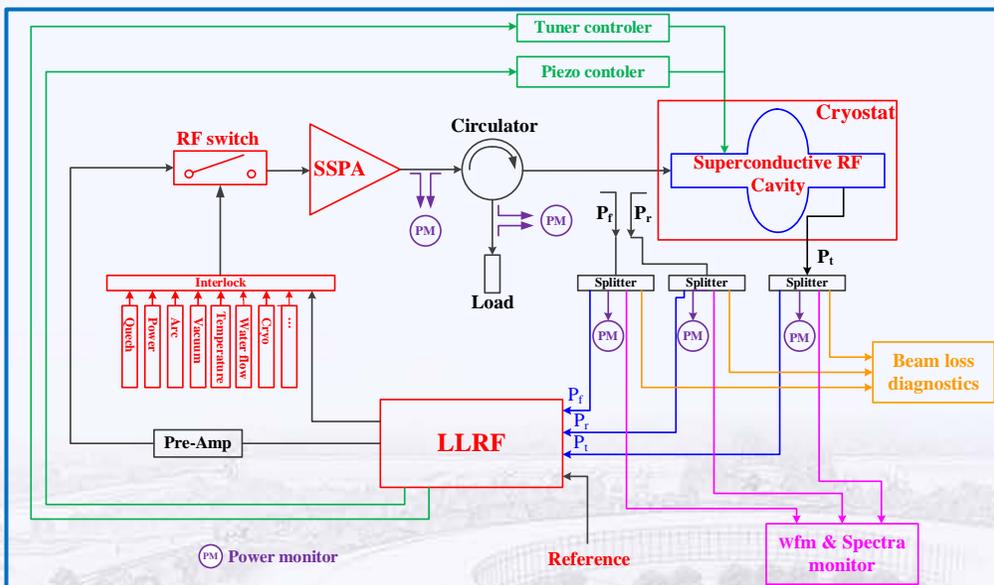


**NSRL**  
National Synchrotron Radiation  
Laboratory

国家同步辐射实验室

# HALF超导主高频系统介绍

HALF超导主高频系统的功能是给储存环中的束流提供腔压，补充由于辐射引起的能量损失；同时给束流提供好的高阶模环境，降低束流的多束团耦合不稳定性。系统主要包含超导高频模组、固态功率源、功率传输系统以及数字低电平与安全联锁系统等。



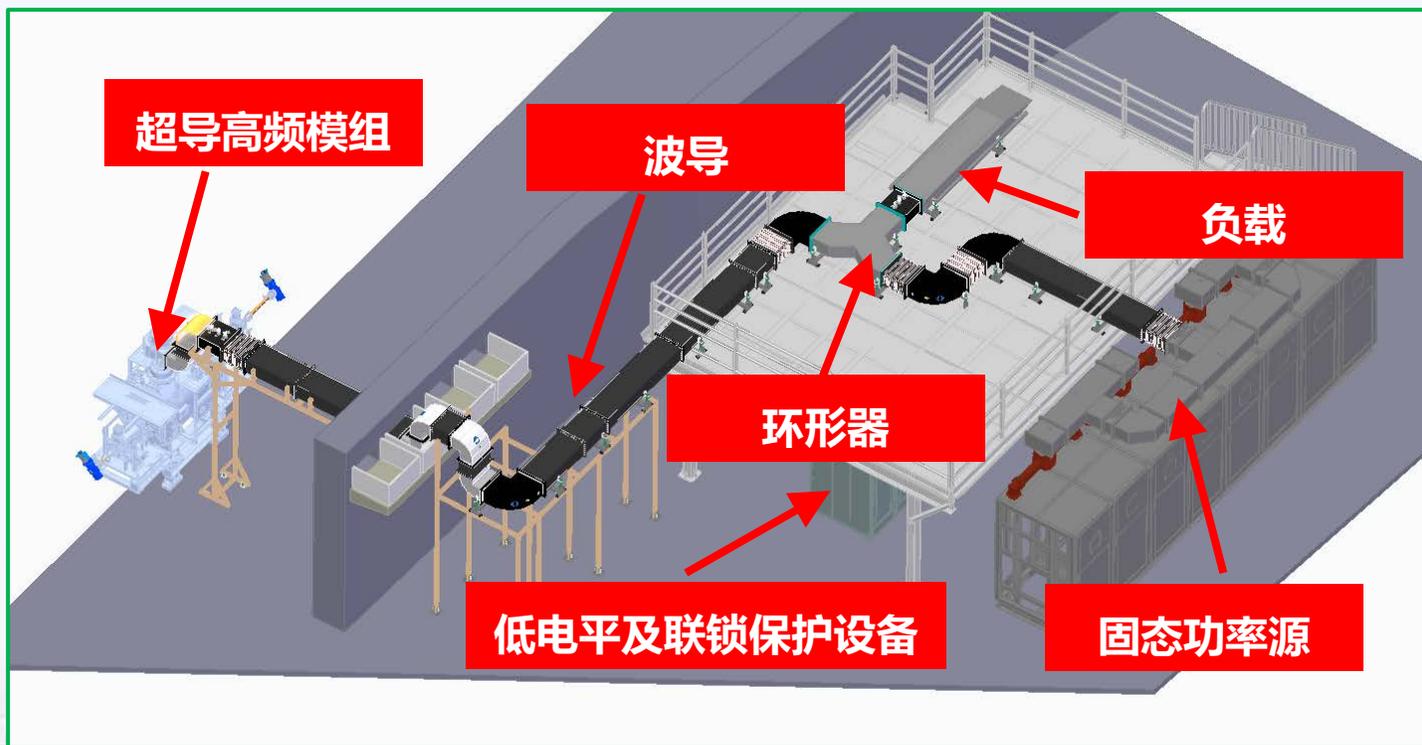
超导主高频系统示意图

各类型设备实现的主要功能：

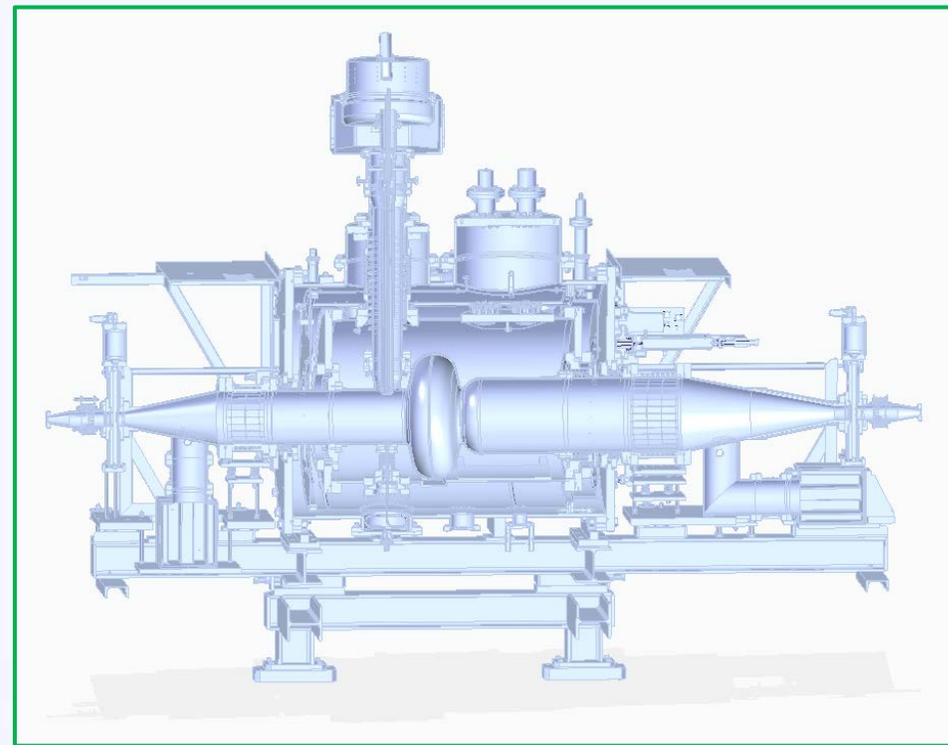
- 1. 超导高频模组：** 给束流提供腔压，补充由于辐射引起的能量损失，为束流提供好的高阶模环境等。
- 2. 固态功率源：** 产生并输出高功率的射频信号。
- 3. 功率传输系统：** 将功率源输出的高功率射频信号传输至超导高频腔处。
- 4. 数字低电平与安全联锁系统：** 实现超导高频腔腔压信号幅度和相位的稳定性以及设备安全联锁保护。

- 为束流提供腔压，补充电子束流的辐射能量损失；
- 保证储存环足够的动量接受度；
- 为束流提供好的高阶模环境，降低多束团耦合不稳定性

# HALF超导主高频系统组成



超导主高频系统三维图



超导高频模组三维剖面图

- 超导高频模组安装在储存环隧道7号长直线节;
- 固态功率源、波导、环形器和负载, 与常温主高频系统共用

# HALF超导主高频系统参数

## 与超导主高频系统相关的储存环物理参数

参数名称	单位	指标
束流能量	GeV	2.2
周长	m	479.86
动量紧缩因子	-	$9.4 \times 10^{-5}$
长直线节长度	m	5.3
长直线节中点处 $\beta_x/\beta_y$ /色散	m	6.78/2.55/0.0
高频腔频率	MHz	499.8 MHz
谐波数		800
电子单圈辐射能量损失 (考虑一期插入件情况)	MeV	~ 0.4 MeV
高频腔腔压(RF能量接受度约为5%，考虑damping wiggler和全环装满插入元件)	MV	~ 1.5
束流设计流强	mA	350 mA
高频系统需要提供的束流功率	kW	~ 140 kW

## 超导主高频系统参数

参数名称	单位	指标
高频频率	MHz	$499.8 \pm 0.2$
材料		铌材
高频电压	MV	1.5MV
腔数		1
Q值		$Q_0 \geq 5 \times 10^8 @ 1.5MV$
反馈控制稳定度		幅度稳定度 $\leq 0.1\%$ ，相位稳定度 $\leq 0.1^\circ$ (RMS, 1s内)
单腔最大功率	kW	$\geq 140$
发射机功率	kW	250 kW
(恒温器) 运行温度	K	4.5
静态漏热	W	$\leq 35$
设计压力	bar	$\leq 1.20 (\pm 1.5 \times 10^{-3})$

**超导高频腔运行在4.5 K低温液氦环境下，为束流提供1.5 MV腔压和140 kW功率**

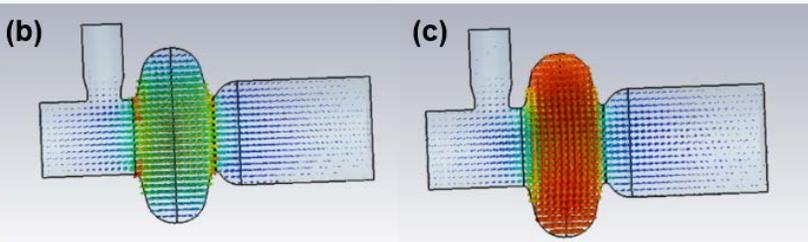
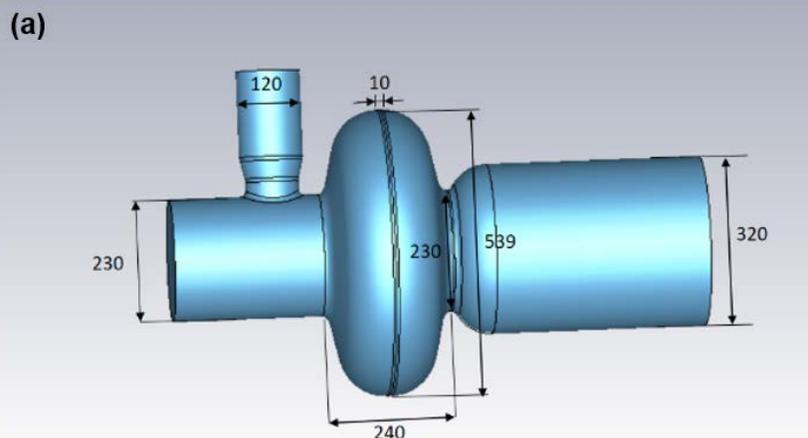
# HALF超导高频腔

## 超导高频腔仿真结果

参数名称	仿真结果
f (MHz)	499.98
R/Q ( $\Omega$ )	88.72
Ep/Ea	2.10
Bp/Ea (mT/(MV/m))	4.39
Q (超导材料)	$2.25 \times 10^9$



HALF超导腔垂直测试  
(怀柔, PAPS测试平台)



HALF超导高频腔仿真模型  
与工作模式电磁场分布



HALF超导腔垂直测试结果  
 **$Q_0 = 1.86 \times 10^9 @ 2.01 \text{ MV}$**   
(合同验收指标:  $Q_0 \geq 5 \times 10^8 @ 1.5 \text{ MV}$ )

- 在合肥先进光源预研项目中, 已完成超导高频腔的研制;
- 高能锐新负责模组集成, 预计26年8月, 完成水平测试

# 固态功率源出厂测试



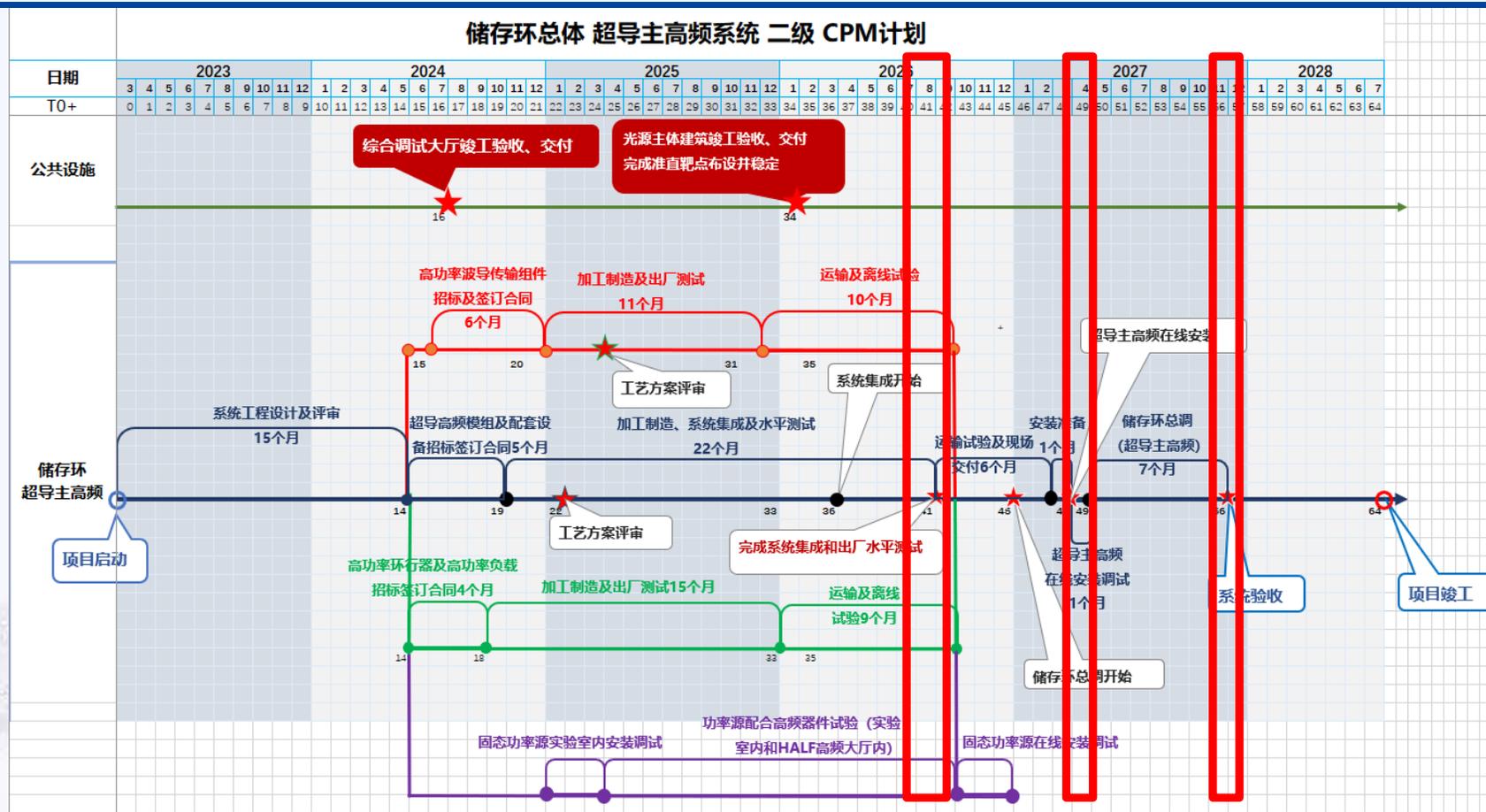
固态功率源出厂测试

合同指标	合同指标要求	测试结果	测试结论
工作带宽 带宽内幅度平坦度 带宽内相位平坦度	工作带宽: 499.8MHz±2MHz, 额定输出功率 >250kW; 带宽内幅度平坦度: <5% (499.8MHz ± 100kHz); 带宽内相位平坦度: <5° (499.8MHz ± 100kHz);	工作带宽: 499.8MHz±2MHz, 输出功率 251kW; 带宽内幅度平坦度: 0.6191% (499.8MHz ± 100kHz); 带宽内相位平坦度: 3.389° (499.8MHz ± 100kHz);	合格
P-1dB 增益变化率 相位变化率	P-1dB: ≥250kW@RFIn≤10±0.5dBm; 增益变化率: <2dB (30kW~220kW); 相位变化率: <15° (30kW~220kW);	P-1dB: >250kW@RFIn≤10±0.5dBm; 增益变化率: 1.7394dB (30kW~220kW); 相位变化率: 1.454° (30kW~220kW);	合格
谐波杂散 相位噪声	谐波: ≤-30dBc@250kW; 杂散: ≤-63dBc@250kW; 相位噪声: ≤-80dBc@499.8MHz, offset 10Hz	二次谐波: -53.32dBc 三次谐波: -77.08dBc 杂散: -92.85dBc 相位噪声: -81.49 dBc, offset 10Hz	合格
工作效率 功率因子	工作效率: >40%@250kW; 功率因子: >0.92@CW;	工作效率: 56.09% 功率因子: 0.995	合格
射频辐射	射频辐射: ≤0.1mW/cm2@30cm	射频辐射: 0.08457mW/cm2@30cm	合格
脉冲工作方式	a)重复频率≤1kHz, 脉宽≤1.5ms; b)上升下降沿: <1us; c) 延时: <300ns; d) 顶降: ≤1dB;	a)重复频率: 1kHz, 脉宽: 0.5ms; b)上升沿: 25.89ns, 下降沿: 25.63ns; c) 延时: 277.03ns; d) 顶降: -0.161dB;	合格
功率冗余	6%功率管不工作情况下, 固态功率源基本指标满足(除 P1dB 输出 250kW 外)	9 个功率管 (6.25%) 不工作的情况下, 固态功率源基本指标满足	合格
电源冗余	电源用并行输出方式: 单功放机柜一个电源模块有故障, 能正常工作	电源用并行输出方式: 八个功放机柜各取走一个电源模块, 固态功率源能正常工作	合格
器件一致性	功放插件参数变化尽量小, 增益一致性±0.2dB, 相位一致性±5°; 整机更换插件后, 输出功率变化在±0.1dB 内, 相位变化在±5°内	功放插件增益一致性: 0.0596dB, 相位一致性: 0.7°; 整机更换插件后, 输出功率变化: 0.0478dB, 相位变化: 2.419°	合格
开环稳	开环相位稳定性: ≤0.15°(峰-峰值), 在 1 秒时	开环相位稳定性: 0.062°(峰-峰值), 在 1 秒时	合格

固态功率源出厂测试部分指标及测试结果

- 预研项目期间, 与成都凯腾一起完成一台250 kW固态功率源的研制;
- 固态功率源, 超导主高频系统与常温主高频系统共用

# HALF超导主高频系统工作计划



- 2026年8月，完成超导高频模组系统集成和出厂水平测试；
- 2027年4月，完成系统在线安装调试；
- 2027年11月，完成系统验收

# HALF超导主高频系统目前进展

## 1. 超导高频模组及配套设备

- 2024年10月，完成招标及合同签订；
- 2025年2月，厂家组织**完成合同工艺评审，模组工程图出图**；
- 2025年3月，厂家组织**完成恒温器设计评审**；
- 2025年3月，与低温系统签订接口文件；
- 2025年5月，厂家组织**完成高次模吸收器设计评审**；
- 2025年6月，超导腔法兰改造完成，高次模吸收器及耦合器正常加工中

## 2. 固态功率源

- 2023年2月，完成功率源的出厂测试；
- 2025年1月，完成功率源功率合成与分配组件采购合同签订；
- 2025年3月，功率源功率合成与分配组件合同**设备到货**；
- 2025年4月，**安装2台功率源机柜**，用于常温腔离线老炼平台，**完成满功率全反射调试**
- 2025年6月，2台功率源机柜**用于第一套KEK-PF型常温高频腔老练**

## 3. 高功率波导传输组件

- 2024年12月，完成招标及合同签订；
- 2025年4月，厂家组织**完成合同工艺评审，波导工程图出图**；
- 2025年6月，进行原材料采购，开始生产

## 4. 高功率环形器和负载

- 2024年8月，完成招标及合同签订；
- 2024年12月，**完成负载合同工程图出图**；
- 2025年5月，完成负载合同物料采购，启动生产；
- 2025年5月，**完成环形器合同工程图出图**
- 2025年6月，完成环形器合同物料采购，启动生产；

# 目录

## CONTENTS



**NSRL**  
National Synchrotron Radiation  
Laboratory

国家同步辐射实验室

01

HALF超导主高频系统介绍

02

HALF常温主高频系统介绍

03

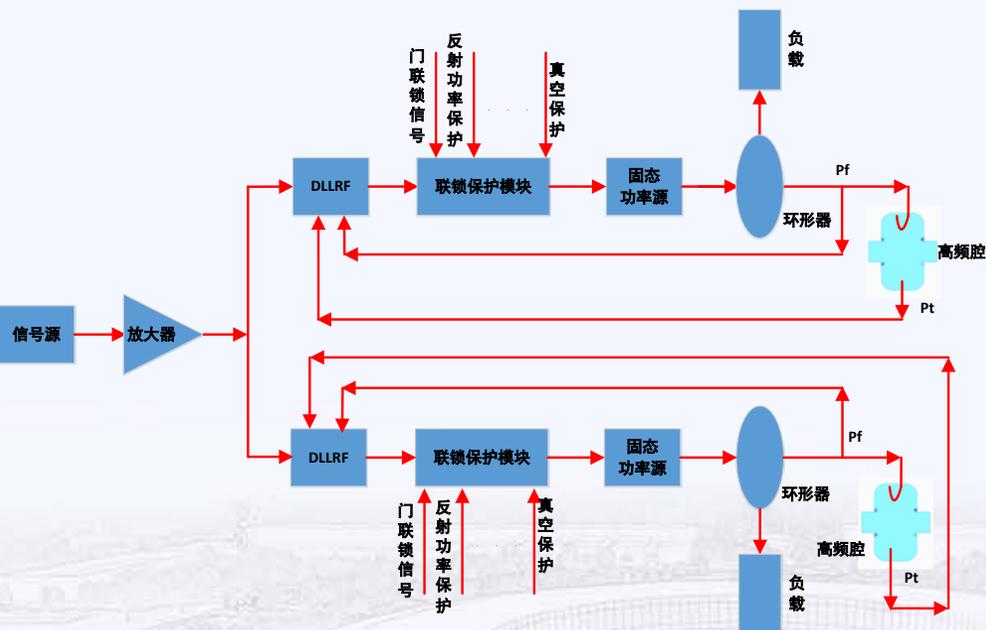
下一步工作计划

# HALF常温主高频系统介绍

在HALF储存环调试初期，常温主高频系统需要提供稳定的腔压，补充电子束流的辐射损失，实现储存环初步束流积累和真空清洗，为超导主高频系统的在线运行提供清洁真空环境。

## 各类型设备实现的主要功能：

1. 常温高频腔：给束流提供腔压( $\geq 0.7$  MV)，补充由于辐射引起的能量损失，实现储存环初步束流积累和真空清洗。
2. 固态功率源：产生并输出高功率的射频信号。
3. 功率传输系统：将功率源输出的高功率射频信号传输至超导高频腔处。
4. 数字低电平与安全联锁系统：实现常温高频腔腔压信号幅度和相位的稳定性以及设备安全联锁保护。

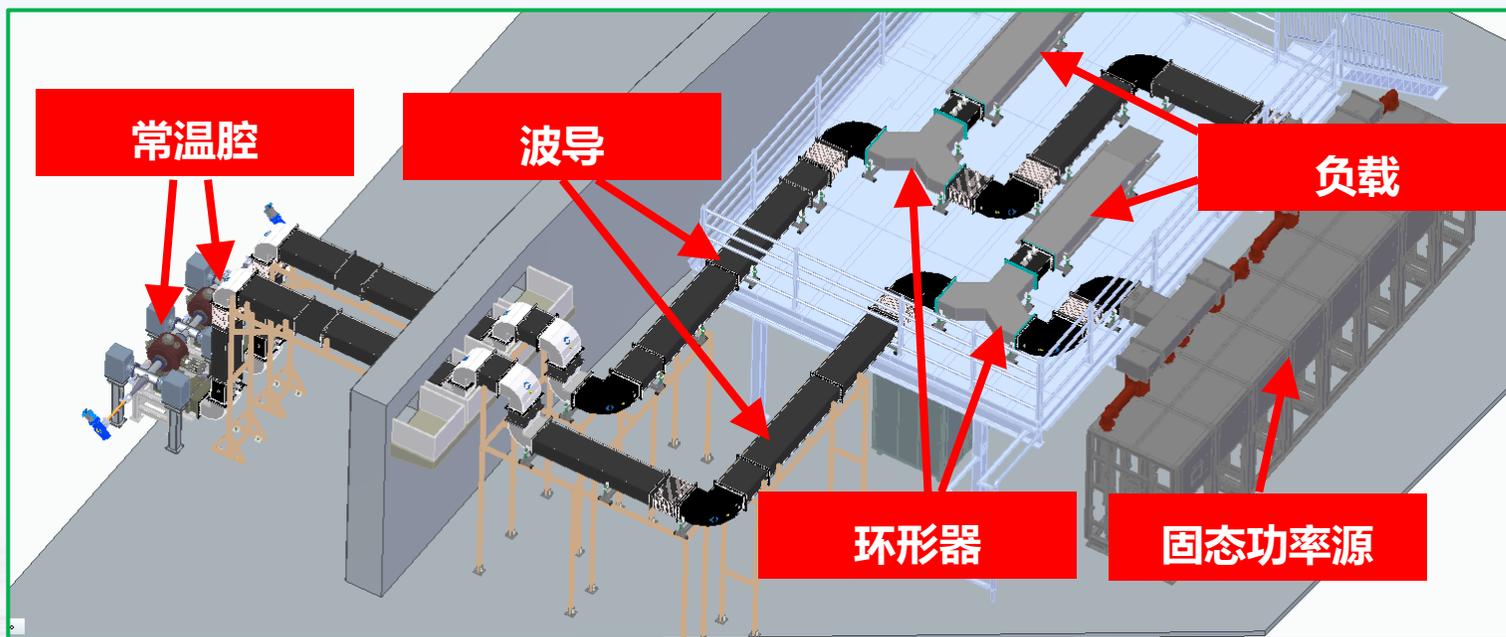


常温主高频系统示意图

□ 2套常温腔，需要提供至少0.7 MV腔压；

□ 从上海应用物理研究所借用2套KEK-PF型常温腔，用于HALF储存环初期调试

# HALF常温主高频系统组成



常温主高频系统三维图



常温腔实物图

- 2套常温腔安装在储存环隧道7号长直线节；
- 固态功率源、波导、环形器和负载，与超导主高频系统共用



# HALF常温主高频系统目前进展

## 1. 常温高频腔

- 2023年4月，从上海借取2套常温腔，运回实验室园区；
- 2023年12月，完成2套常温腔的真空清洗和测试；
- 2025年5月，完成离线高功率测试平台搭建；
- 2025年6月，开始进行第一套常温腔的老练

## 3. 高功率波导传输组件

- 2024年12月，完成招标及合同签订；
- 2025年4月，厂家组织完成合同工艺评审，波导工程图出图；
- 2025年6月，进行原材料采购，开始生产

## 2. 固态功率源

- 2023年2月，完成功率源的出厂测试；
- 2025年1月，完成功率源功率合成与分配组件采购合同签订；
- 2025年3月，功率源功率合成与分配组件合同设备到货；
- 2025年4月，安装2台功率源机柜，用于常温腔离线老练平台，完成满功率全反射调试
- 2025年6月，2台功率源机柜用于第一套KEK-PF型常温高频腔老练

## 4. 高功率环形器和负载

- 2024年8月，完成招标及合同签订；
- 2024年12月，完成负载合同工程图出图；
- 2025年5月，完成负载合同物料采购，启动生产；
- 2025年5月，完成环形器合同工程图出图
- 2025年6月，完成环形器合同物料采购，启动生产；

常温主高频系统与超导主高频系统很多设备共用，这些设备目前合同执行进展顺利；常温腔正在进行高功率测试。

# 常温高频腔真空清洗烘烤



内腔高压水冲洗



清洗后真空检漏



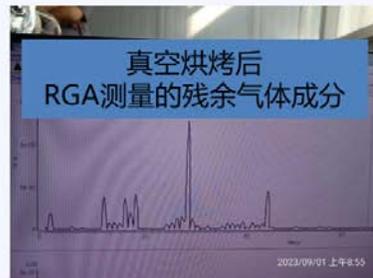
清洗和检漏后  
微波冷测



真空烘烤



真空烘烤后真空度



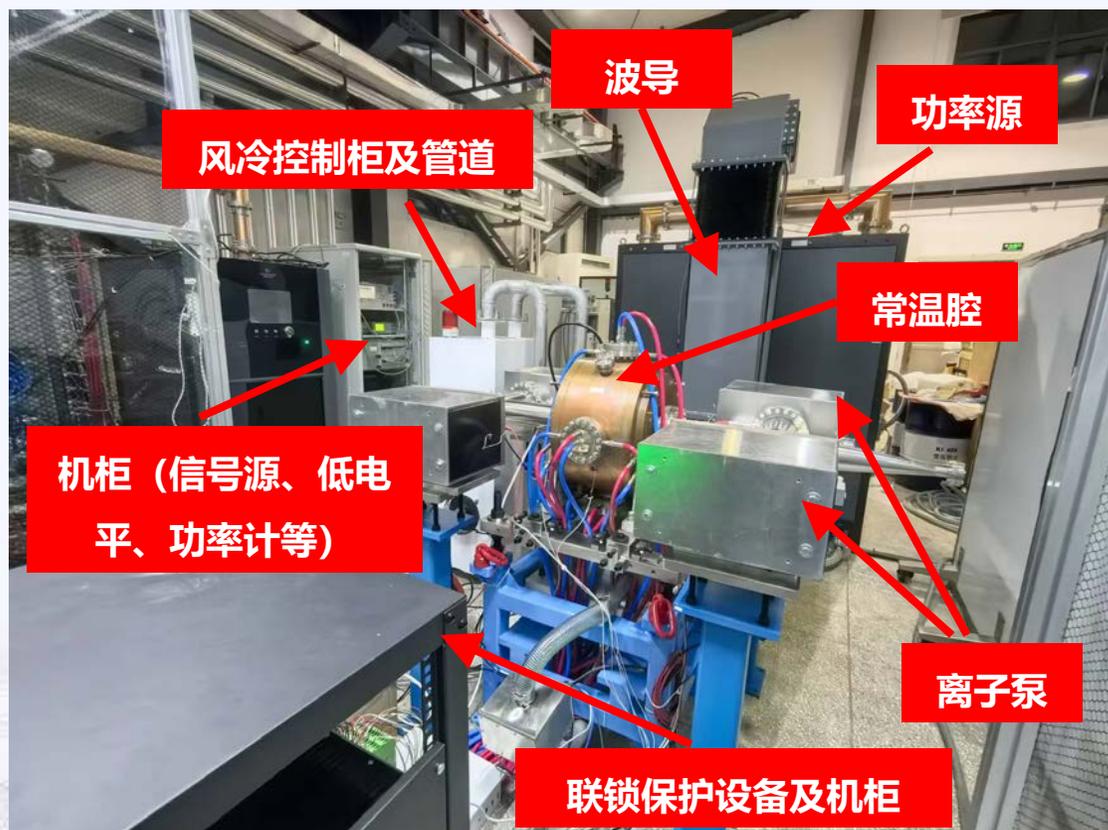
2套常温主高频腔清洗前、清洗后和真空烘烤后的微波参数

		工作频率 /MHz	驻波比	有载Q值	无载Q值
No. 1	清洗前	499.8	1.49	10987	27358
	清洗后	499.8	1.75	12245	33723
	真空烘烤后	499.8	1.78	12144	33760
No. 2	清洗前	499.8	1.81	12246	34411
	清洗后	499.8	1.82	12391	34881
	真空烘烤后	499.8	1.91	12204	35489

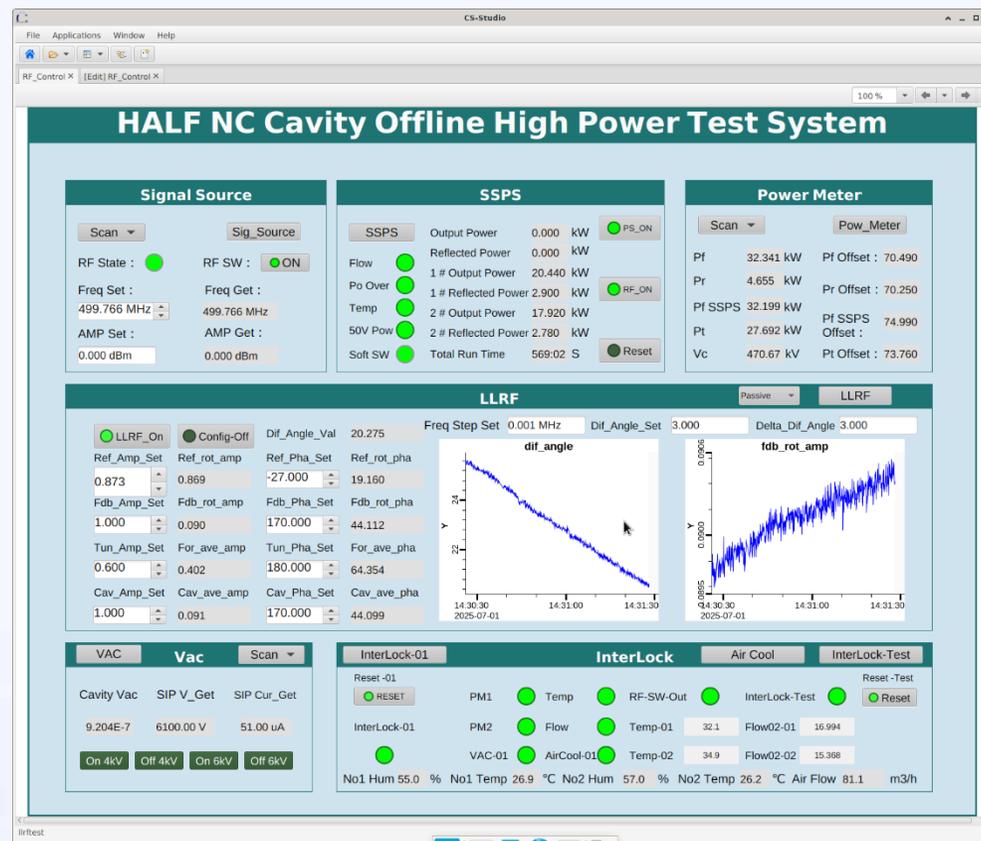
常温高频腔真空清洗烘烤过程照片

- 2套常温腔真空清洗后，静态真空度约 $7.5E-7Pa$ ；
- 2套常温高频腔清洗前后Q值变化不同，可能是这2套常温主高频腔长期存放的条件不同导致

# 常温高频腔高功率测试



常温高频腔高功率测试平台实物图



常温高频腔高功率测试平台OPI界面

- 高功率测试平台搭建完成, 烘烤后静态真空度好于 $5E-8Pa$ ;
- 第一套常温腔正在老练中, 目前脉冲模式下 (重频10 Hz、占空比20%) 腔压已达到470 kV

# 目录

## CONTENTS



**NSRL**  
National Synchrotron Radiation  
Laboratory

国家同步辐射实验室

01

HALF超导主高频系统介绍

02

HALF常温主高频系统介绍

03

下一步工作计划

# 超导主高频系统-工作计划

- ① 2025年7月，完成超导高频腔后处理及垂测；
- ② 2025年12月，完成高功率波导传输组件合同设备出厂测试；
- ③ 2025年12月，完成高功率环形器和负载到货及开箱验收；
- ④ 2026年8月，完成超导高频模组系统集成和出厂水平测试；
- ⑤ 2027年4月，完成系统在线安装调试；
- ⑥ 2027年11月，配合完成储存环总调，完成系统验收

# 超导主高频系统-超导高频模组合同

□ 定期与高能锐新、高能所召开例会，及时沟通

解决问题；

□ 系统内人员经常驻场，及时跟踪进度；

□ 关键节点全程参与（超导高频腔垂测、超导高

频模组水平测试等）；

□ 招标采购备用模组，降低光源运行风险



# 常温主高频系统-工作计划

- ① 2025年12月，完成高功率波导传输组件合同设备出厂测试；
- ② 2025年12月，完成高功率环形器和负载到货及开箱验收；
- ③ 2025年12月，完成2套常温高频腔的高功率测试；
- ④ 2026年12月，完成系统在线安装调试；
- ⑤ 2027年1月至3月，配合储存环完成初期调试，完成系统验收



# THANKS



国家同步辐射实验室  
NATIONAL SYNCHROTRON RADIATION LABORATORY

