



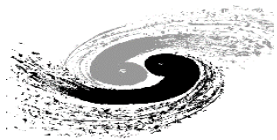
功率源系统运行

BEPCII运行年会-2025

报告人：李飞

BEPCII-功率源系统

2025-10-13，河南，郑州



内容

- 一 设备运行情况
- 二 设备升级与测试
- 三 寿命与可靠性研究
- 四 总结与展望

设备运行情况

• 系统组成

- 电子枪系统、调制器、速调管、正电子源系统、功率源测试台

• 设备特点

- 时间跨度大：BEPC、BEPCII、BII升能、BII-U
- 有源强脉冲功率设备，数量多，50Hz重频，固有故障率较高
- 专业跨度大：电气与电子、控制、真空电子、微波与电磁场

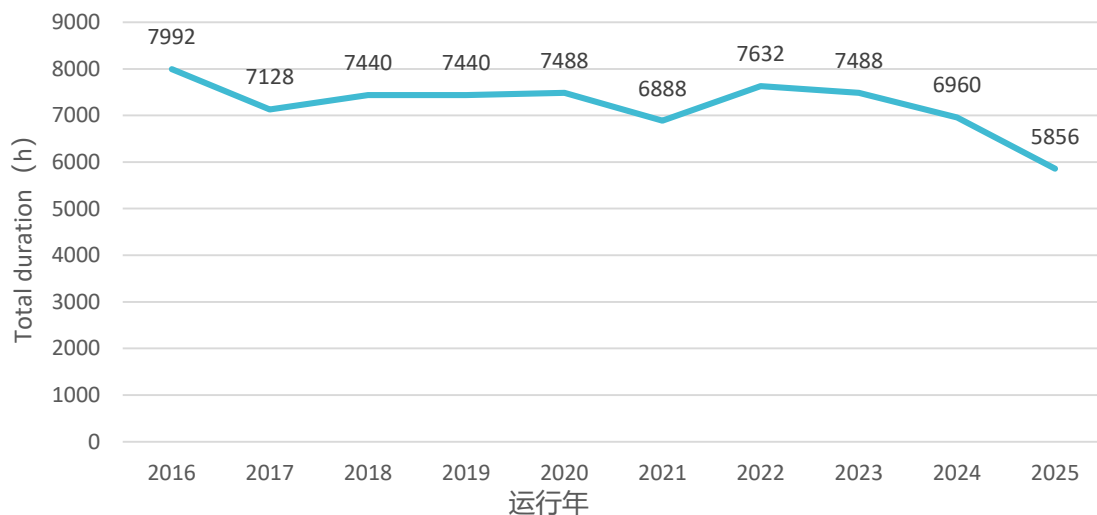


总体

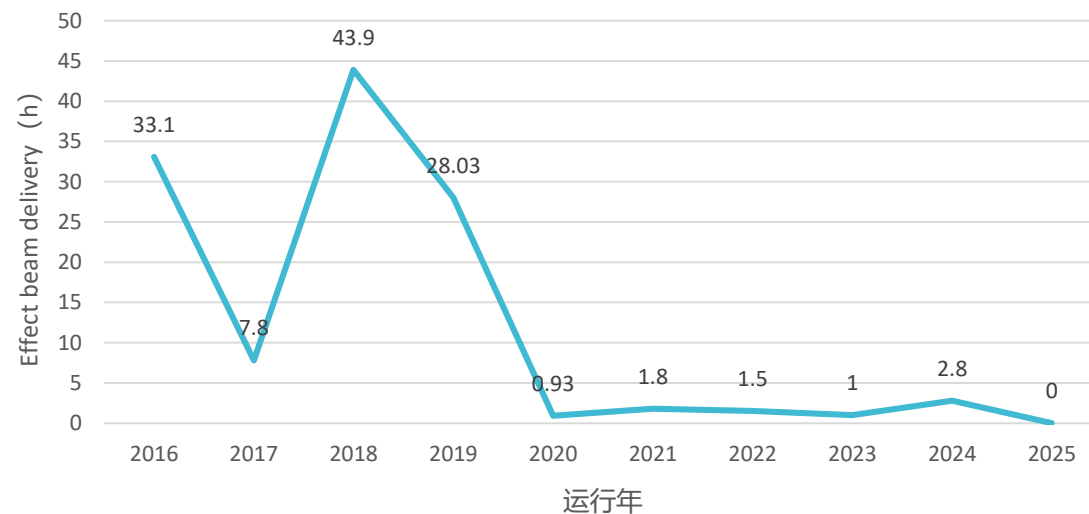
• 任务和目的

- 保障BEPCII稳定运行和BII-U升能任务，HEPS运维调束、PWFA建设、CEPC EDR。。。；
- 电子枪系统，功率源系统（速调管(22)，调制器(22)），正电子源系统，9#厅功率源测试台，2#厅功率源测试台，9#厅电子枪测试台；

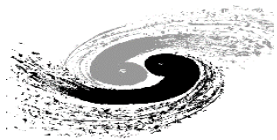
2016-2025运行时长统计



2016-2025影响供束时长统计



- 预判故障、可靠性提升、设备升级等措施保持多年极低故障率，本年度影响供束时间0h。



电子枪

• 电子枪系统运行

- 2024年10月10日~2025年7月28日，电子枪：5088小时/212天，运行稳定，0故障。

• 暑期检修

- 25KV/10KW高压充电机与高压充电电缆改造及更换（> 30m）；
- 脉冲变压器油缸清洗及检修；
- 强脉冲振动检修；
- 高压常规检修；
- 放电柜常规检修；
- 高压塔设备的例行监测；
- pulse触发波形，温度监测、压缩空气调节；
- 电子枪房间改造，制冷空调检修。。

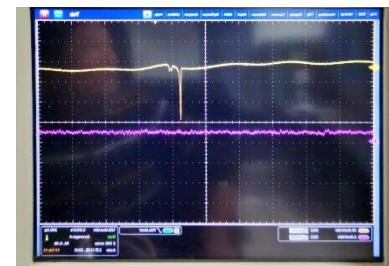




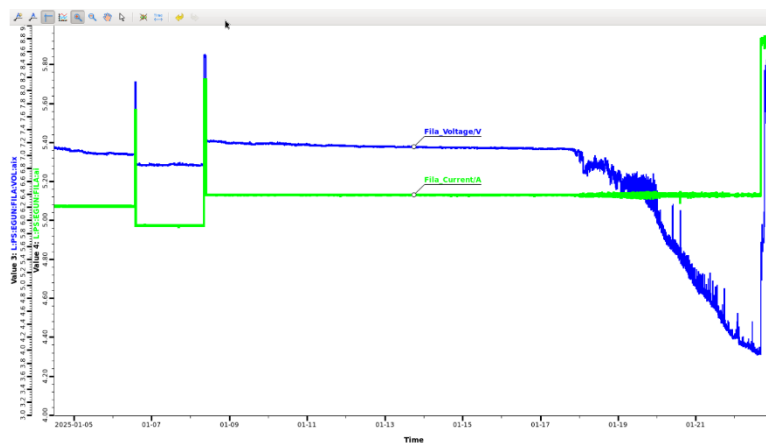
电子枪

• 阴栅组件更换

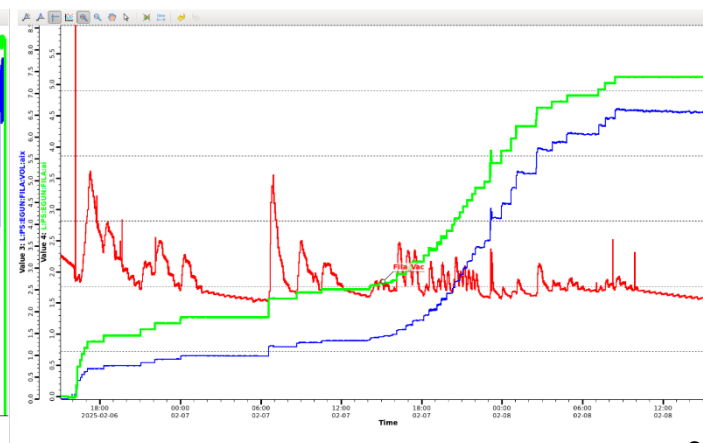
- 2025.1.17~1.22, 灯丝电流恒定, 电压逐步衰减, 对应发射逐步降低 (Y796);
- 2025.2.5, 更换新的阴栅组件,Y796; **安装过程摔了一下;**
- 2025.2.6~2.8, 阴极激活, 束流调试, 状态异常 (**栅极-阴极短路**) ;
- 2025,2,9~2.12, 再次更换阴栅组件, 并重新激活, 恢复束流。



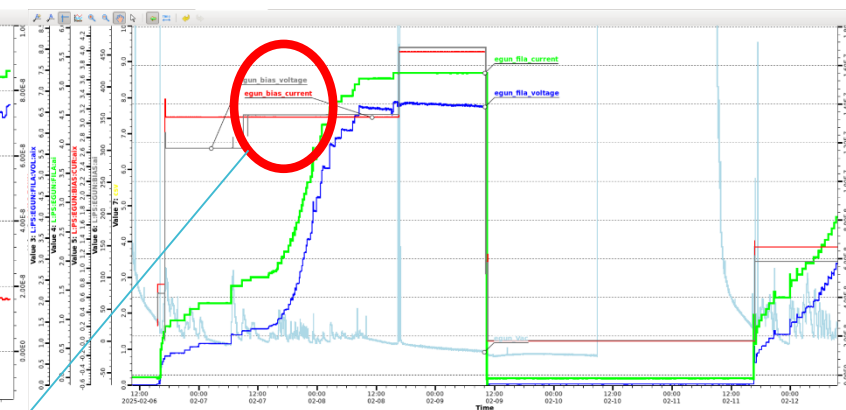
BCT束流信号



灯丝电压衰减

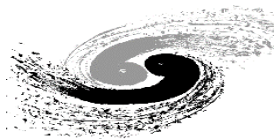


第一支新阴极激活全过程



- 偏压参数突变 (**对应栅-阴阻抗发生变化, 栅-阴 短路**)
- 灯丝工作点: 1.3A/1.2V左右

- 目前有一支Heatwave (电子枪测试台) 备件, 最近一次测量发射正常 (2024.11)



调制器

• 调制器运行

- 2024年10月10日~2025年7月28日，功率源：5856小时，运行稳定，0故障；
- BII-U新增两套固态调制器。

• 暑期检修

- **强脉冲振动检修：**螺钉紧固、高低压触头检查及更换；
- **高压常规检修：**高压脉冲电阻更换、高压电缆连接组件检修、高压绝缘结构件检修，反峰电路核查，静电吸附灰尘处理；
- **放电柜常规检修：**柜内照明，排风风机，连接件，闸流管触发电缆等。
- 机柜内设备位置调整；
- 聚焦电源集中位置调整；
- 闸流管轮替和更换。



调制器

• 闸流管

- 采用全国产GL闸流管，平均寿命**24452**小时（进口e2V闸流管寿命19176小时）；
- 暑期主动下线到达寿命闸流管，对前7个关键工位的闸流管替换，确保本轮运行时全在寿命周期内，从而保障供束。

2024~2025年退役闸流管

序号	退役	闸流管编号	厂家	启用时间	停用时间	运行时间
1	fault-1	2105030201	GL	2022/9/15	2025/7/28	20376
2	fault-2	2107140401	GL	2022/3/23	2025/7/28	23424
3	fault-3	2206190201	GL	2022/9/15	2025/7/28	20208
4	fault-4	2101190501	GL	2022/3/23	2025/7/28	21672

BEPCII闸流管运行时间统计数据

序号	位置	闸流管编号	启用时间	运行时间
1	01#	2306100601	2024/10/8	6984
2	02#	2312020301	2025/8/17	1032
3	03#	2312020101	2024/10/8	6984
4	04#	2501060301	2025/8/17	1032
5	05#	2306100501	2025/8/17	1032
6	06#	2312020201	2025/8/17	1032
7	07#	2205190501	2023/4/25	16176
8	08A	2112070101	2023/3/14	17184
9	08#	2304250101	2023/9/15	13944
10	09A	2303150101	2023/9/15	13944
11	09#	2304250301	2024/10/8	6984
12	10#	2312020401	2024/10/8	6984
13	11A	2302100401	2023/9/15	13944
14	11#	2309280301	2024/6/11	7464
15	12#	2203180401	2023/9/15	13944
16	13A	2407110201	2024/10/8	6984
17	13#	2203180201	2023/9/15	13944
18	14#	2103250301	2022/9/15	19776
19	15#	2203180601	2023/9/15	12912
20	16#	2203180301	2023/6/8	15120
21	电子枪	2212020101	2023/9/15	13944
22	测试台	2303150201	2025/4/8	3744

闸流管运行时间



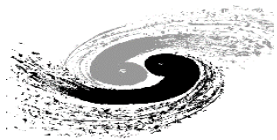
速调管

•速调管运行：截至2025.7.29

- 进口：14支；
- 国产：8支（7支国产+1支返修）；
- **国产管运行数量创新高。**

位置	型号	功率(MW)	运行时长 (h)
1#	三菱2018-1	30	41480
2#	佳能-1H110	44	20960
3#	汉光2017-3	20	57992
4#	佳能21J111	40	20960
5#	东芝22A113	38	27872
6A#	东芝22B115	29	6608
6#	三菱2017-1	39	50720
7#	三菱2018-3	44	21912
8A#	汉光202101	41	17168
8#	翻修 19	35	43040
9A#	东芝11F021	45	101994
9#	汉光2021-2	40	22400
10#	三菱2018-2	44	35816
11A#	东芝11H024	45	100410
11#	汉光2018-2	40	34640
12A#	东芝22E116	35	6648
12#	汉光 202303	35	3180
13A#	汉光202201	40	13392
13#	汉光2017-2	35	56312
14#	三菱2017-4	0	53132
15#	东芝13J029	0	78618
16#	三菱2017-2	0	57824

速调管运行时间



速调管

•速调管下线及故障处理

- 5 #速调管(佳能-21F108)漏气下线，运行21440小时；进口速调管（22A113）上线；
- 12#（东芝15C031）速调管窗漏，在2025.02.05日下线，累计运行72344小时；国产速调管（202303）上线；



佳能-21F108下线

佳能22A113上线



速调管窗漏

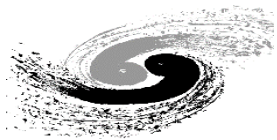


东芝15C031下线



国产202303上线

- 暑期更换了所有国产速调管变压器油，并对在线绝缘油进行了耐压测试。



正电子源

• 正电子源系统运行

- 2024年10月10日~2025年7月28日，正电子源：5088小时，运行稳定，0故障；
- 完成全固态脉冲电源升级；

• 暑期检修

- 正电子转换靶：拆除转换靶前端的五倍频腔（真空管道代替），**降低局部剂量并提升正电子调束效率，持续稳定运行；**
- 隧道内吸收组件的位置更新；
- 油浸式水冷吸收组件→风冷吸收组件；
- 拆除原有的水冷回路；
- 正电子靶执行器加入润滑油；
- 对损坏的监测靶室红外测温仪进行了更换。



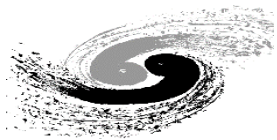
拆除五倍频腔



正电子靶执行器维护

设备升级与测试

- 电子枪固态脉冲电源升级
- BII-U新增固态调制器功率源
- 高稳定度充电电源改造
- 调制器高压电子器件国产化
- 功率源辅助电源
- 50MW国产速调管
- 国产隔离窗
- 功率源联锁与控制
- 正电子固态脉冲电源升级
- 正电子转换装置备件



电子枪固态脉冲电源升级

•背景

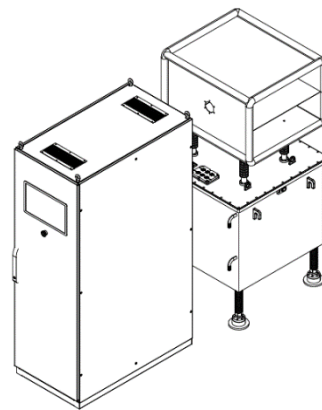
- 原电子枪脉冲电源（人工线型）固有故障率高，有限寿命，设备老化，可靠性低；
- 脉冲重复稳定度低。

•设备升级

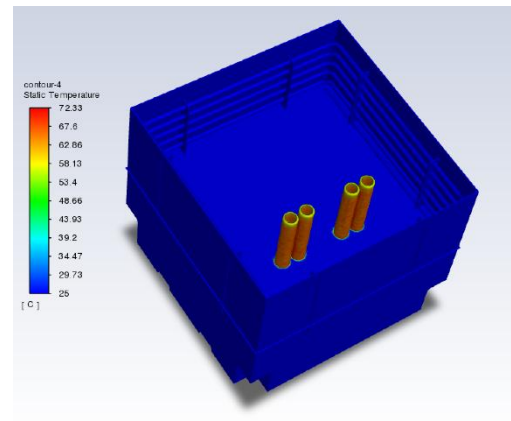
- 提高可靠性与寿命；重复稳定性；
- 采用自研固态脉冲电源方案，
- 完成紧凑型固态脉冲电源的设计方案；
- 目前正在加工中。



现有电子枪放电机柜



电子枪固态脉冲电源设计图





BII-U新增固态调制器功率源

•背景

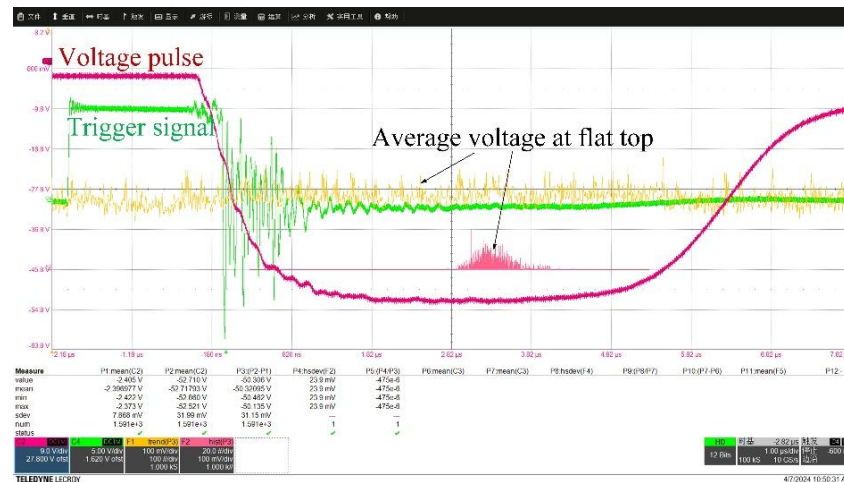
- 满足BEPCII-U升能到2.35~2.8 GeV，根据物理需求在K6A，K12A增加2套功率源；
- 固态调制器可靠性高，脉冲重复稳定度高。

•BII-U新增固态调制器功率源

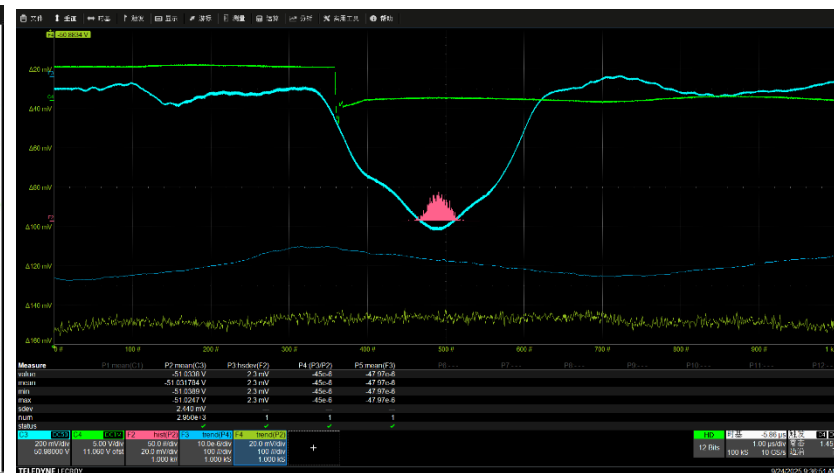
- 采用固态调制器方案；2024年10月，完成安装调试；
- 人工线型调制器最优重复稳定度778ppm，固态调制器为45ppm，**提升一个量级。**



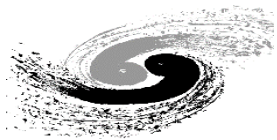
K6A固态调制器



人工线调制器脉冲重复稳定度



固态调制器脉冲重复稳定度



高稳定度充电电源改造

• 背景

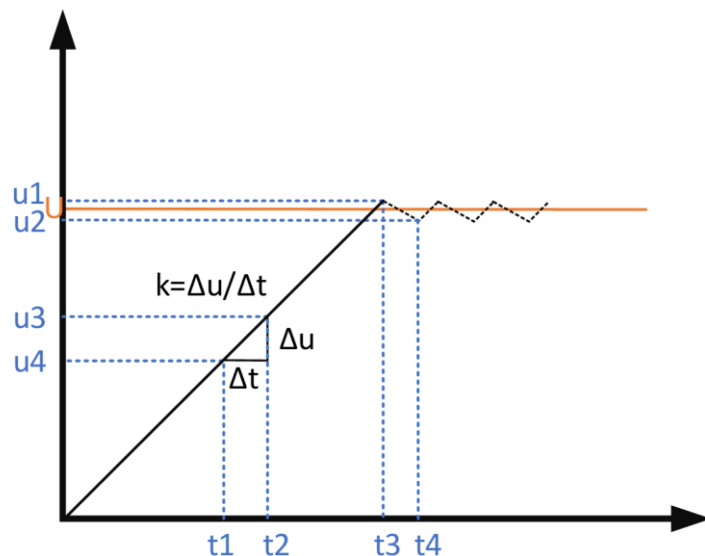
- 在线20套人工线型调制器重复稳定度较低，主要受限于充电电源的纹波影响（千分之五）；
- 千分之五→万分之五，可以将调制器稳定度提升一个量级，从而提升束流稳定性一个量级。

• 高稳定度充电电源改造

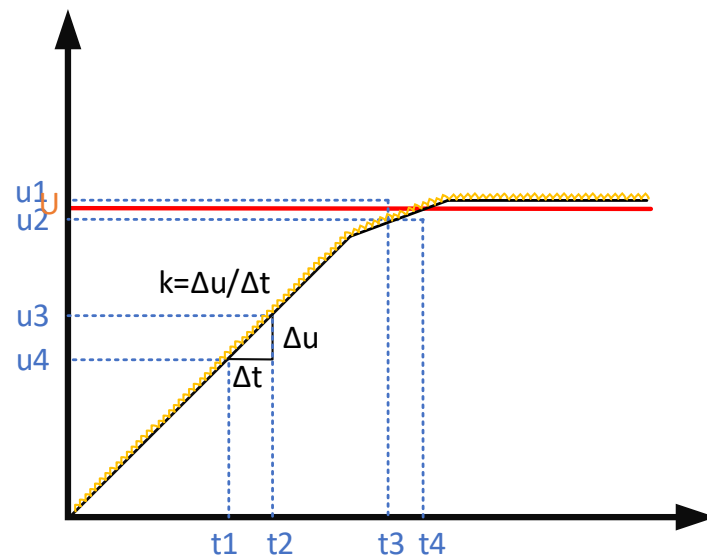
- 将充电电源主机模块增加额外小电流电源，降低充电曲线末端电流值，达到降低纹波目的；
- 正在进行样机方案设计。



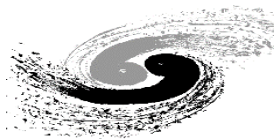
现有高压充电电源



现有高压充电电源充电维持



增加小电源充电维持



调制器高压电子器件国产化

• EOLC反峰组件

- EOCL反峰二极管进口供应商不再生产，已解决国产替代；
- 重新设计制作样板，绝缘性能更高，稳定运行2轮。

• 充电保护组件

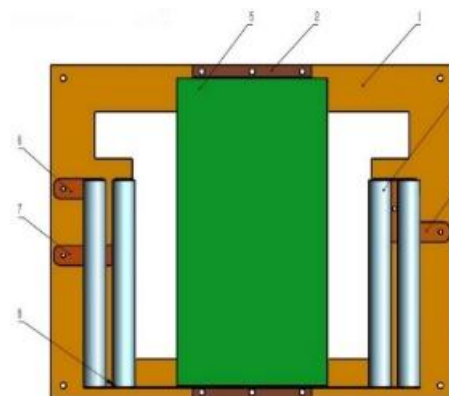
- 充电保护组件高压硅堆进口供应商不再生产，已解决国产替代；
- 优化背板电气结构和布局，稳定运行3轮。



反峰组件击穿



新设计反峰组件

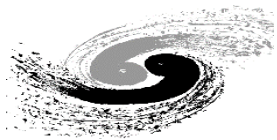


充电保护组件设计

序号	名称	规格	数量
1	充电保护高压硅堆-A	环氧树脂封装	4
2	硅堆连接件1	紫铜螺栓	8
3	固定底座	316L/304	16
4	电阻引出夹箍-A	紫铜	4
5	硅堆	50kV/5A	4
6	电阻引出夹箍1-A	紫铜螺栓	4
7	电阻引出夹箍2-A	紫铜螺栓	4
8	硅堆连接件2	紫铜螺栓	4



新设计充电保护组件



功率源辅助电源

• 闸流管触发盒

- 地线干扰、闸流管老化等因素引发多次故障隐患；
- 重新优化设计制作闸流管触发盒，下一年度进行在线测试。

• 速调管灯丝电源

- 速调管灯丝电源老化，已无备件；
- 测试了工业用数字交流电源，速调管打火时，响应速度快导致掉灯丝；
- 新采购的灯丝电源稳定运行近一轮。





50MW国产速调管

•背景

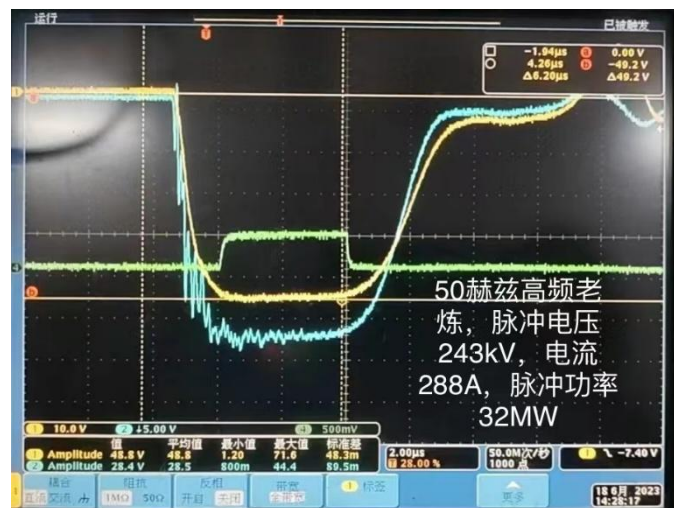
- 在国产65MW速调管研制基础上，推进外形尺寸与现有50MW速调管完全一致的国产速调管研制，做到完全替代进口速调管。

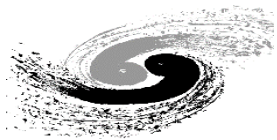
•目前状态

- 已完成样管高功率测试，合作厂家已完成2支50MW速调管加工并运抵上海高研院。

•下一步工作

- 与合作厂家继续推进50MW速调管国产化，BII运行费也将优先采购国产50MW速调管，直至完全替代。

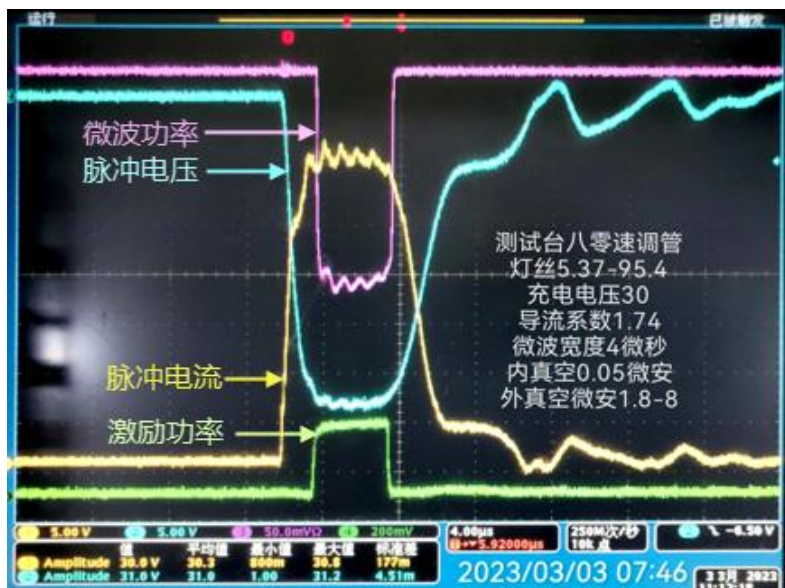




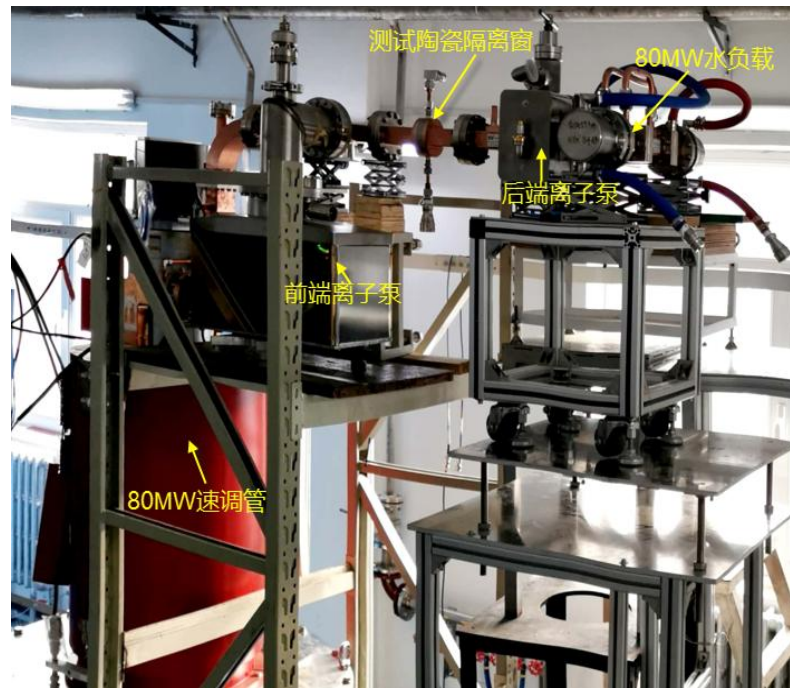
国产隔离窗

• 国产隔离窗

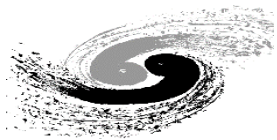
- 优化目前隔离窗设计，提高功率容量；
- 已完成4套隔离窗高功率测试，达到40MW；
- 下一步国产速调管输出窗将尝试采用该隔离窗方案，提高功率冗余。



陶瓷隔离窗功率测试波形



80MW速调管、测试陶瓷隔离窗、真空系统图



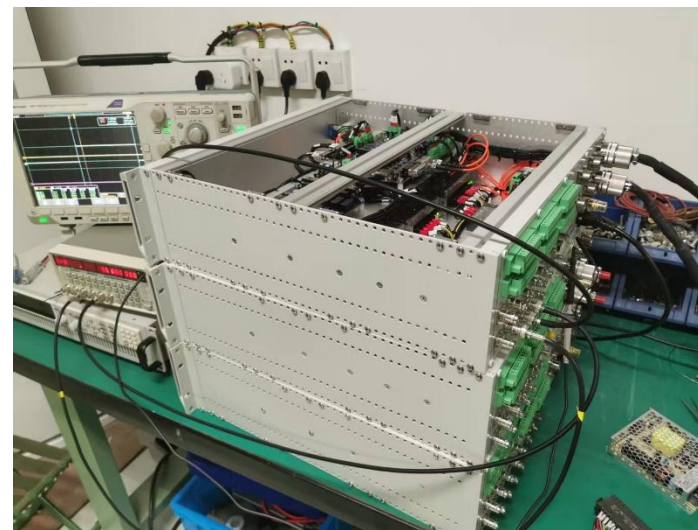
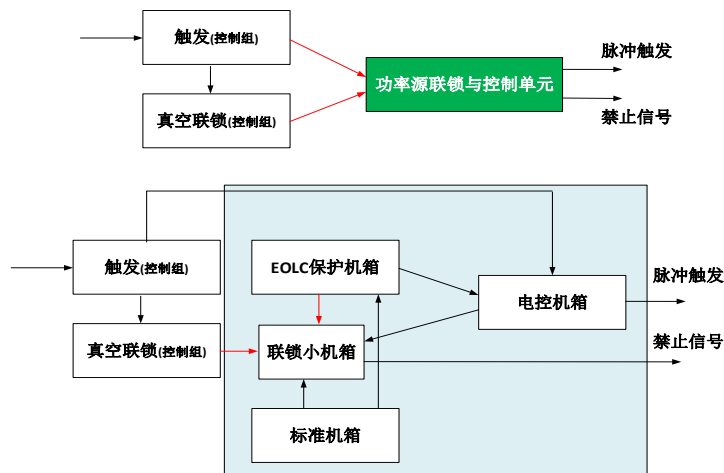
功率源联锁与控制

• 联锁设备现状

- 模块多：EOLC联锁插件、触发联锁插件、触发控制模块、触摸屏；
- 版本多，时间跨度大。

• 升级

- 样机设计：多模块集成，一体化设计；
- 目前完成度（8/22）。

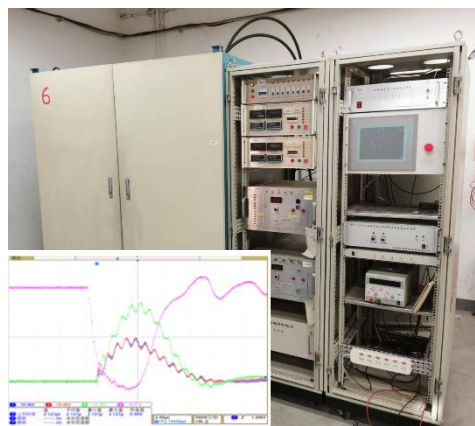




正电子固态脉冲电源升级

• 固态脉冲电源升级

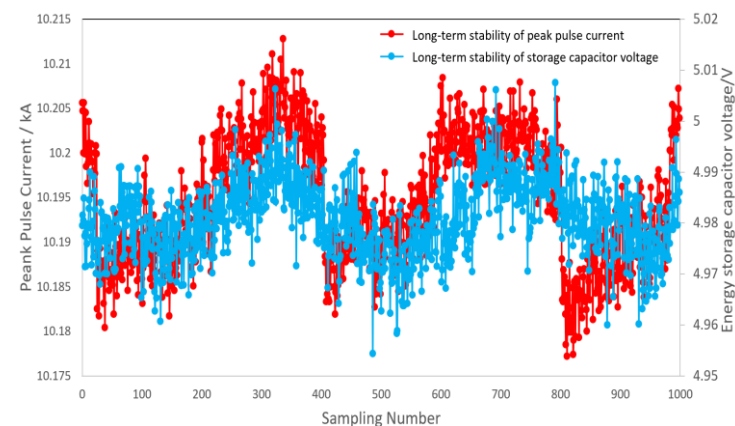
- 从双闸流管并联脉冲电源升级为全固态脉冲电源;
- 当前, 脉冲电流重复稳定度800ppm, 受限于充电电源稳定性;
- 下一步将对充电电源进行升级;



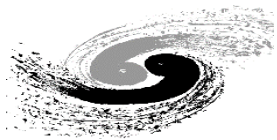
双闸流管并联脉冲电源



全固态脉冲电源



脉冲电流重复稳定度监测



正电子转换装置备件

•开展脉冲磁号对正电子注入的影响实验

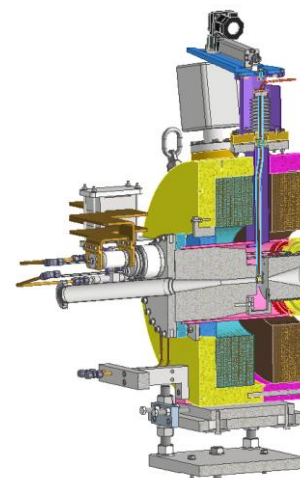
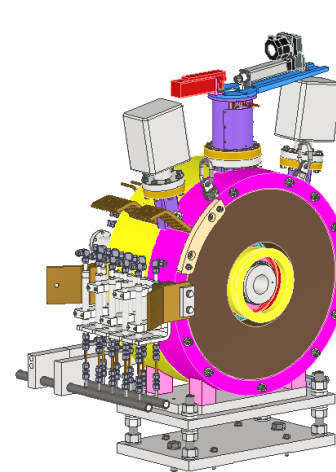
- 从直线末端束流信号反馈，有无脉冲磁号，正电子束流峰值分别为120mV和90mV；

•正电子转换装置备件进展

- 基于已有的脉冲磁号完成正电子转换装置三维机械设计的重新建模，并进行螺线管磁场的重新计算；
- 讨论并明确各部件的加工工艺（转换靶传动机构、真空室、螺线管、高压传输组件、水冷系统、机械支撑）；（机械组吴蕾）
- 设计工作基本完成，下一步准备开始采购；



有无脉冲磁号束流信号监测



正电子转换装置备件及机械设计

寿命与可靠性

- 阴栅组件数据分析
- 闸流管
- 高压脉冲电缆寿命数据及分析
- 高压充电机直流电缆及组件
- 速调管寿命评估
- 接地有效性测量



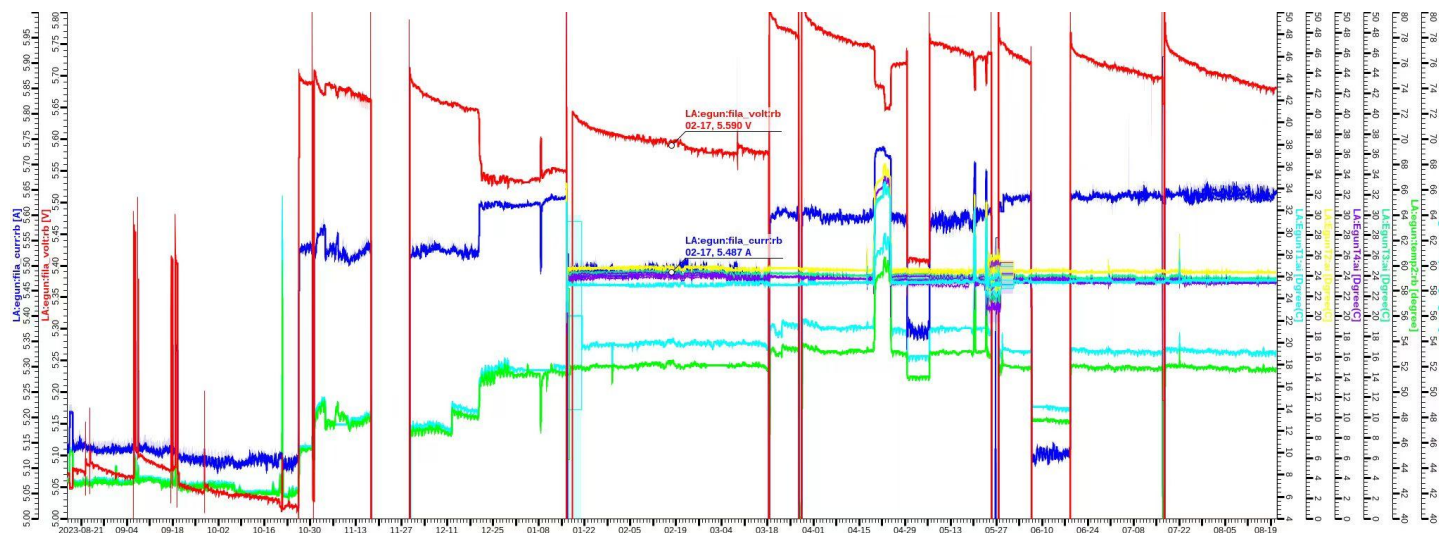
阴栅组件数据分析

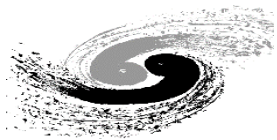
● 寿命评估

- 建立阴栅组件历史运行数据统计。

● 可靠性工作

- 阴极灯丝电压持续性衰减，对应BCT1流强也会降低；
- 通过提高电流来提升功率，保持阴极温度和发射；
- 灯丝电源/功率变化，结合BCT1流强/电荷量变化，可为热阴极材料在线寿命与更换，提供参考依据。





闸流管

• 寿命评估

- 建立完善的闸流管寿命评价体系;
- e2V闸流管寿命19176小时;
- 国产GL闸流管24452小时。

• 寿命延长

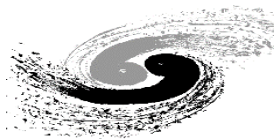
- 运行过程中，优化脉冲电流参数，延长寿命。 预触发与触发波形

• 可靠性工作

- 性能监测（预触发，触发波形，及时优化参数）；
- 开关机、模式切换、季度性、隐患工位等监测；
- 替换和主动下线；保障供束。



预触发与触发波形测量



高压脉冲电缆寿命数据分析

•现状分析

- 高压脉冲电缆故障次数逐年增加;
- 脉冲电缆进口供应商不再生产;
- 电缆接头全球只有一家美国公司加工 (周期2年) 。

•寿命评估

- 分析历史数据, 建立寿命评估体系。

•可靠性工作

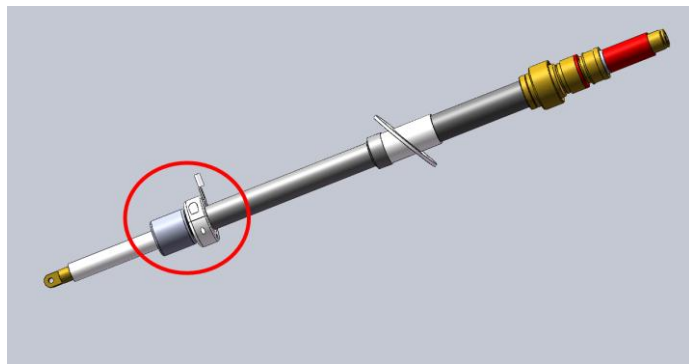
- 关注电缆绝缘, 到达寿命主动更换;
- 联合国内厂家研制电缆及组件, 完成方案设计。



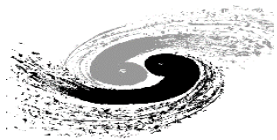
K16 高压脉冲电缆击穿



进口高压脉冲电缆及组件



高压脉冲电缆及组件设计



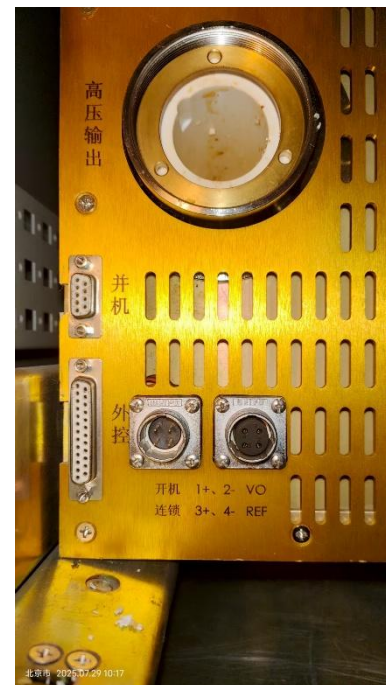
高压充电机直流电缆组件

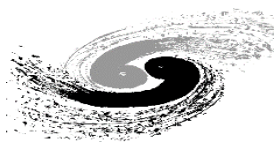
•现状分析

- 对电缆组件进行了工艺、工作状态、电场分析，提出改造方案；
- 改造后，运行4轮故障为零；
- 改造后电缆组件寿命未知，可能集中性能变差，出现击穿等；
- 暑期检修中，组件出现高压电弧碳化（已处理）。

•可靠性工作

- 关注电缆绝缘，检修期间涂抹硅脂；
- 建立寿命评估体系，到达寿命主动更换。





退役速调管信息汇总

•进口

■下线26支（1支测试台下线/数据不全），最长寿命105730小时，最短720小时。

•国产

■下线6支（2支返修），最长58636小时，最短2980小时。

序列号	寿命(h)	下线原因	序列号	寿命(h)	下线原因	序列号	寿命(h)	下线原因	序列号	寿命(h)	下线原因
04B001	71136	管内出气	05E014	90618	主动下线	11H025	73210	主动下线	国产1号	50038	窗漏
04D002	101290	管内出气	05F015	56880	发射低	11J026	70642	主动下线	2008-1	33384	窗漏
04E003	58320	窗漏	05J016	3120	窗漏	11G023	720	窗漏	国产2号	27408	管内出气
04E004	67176	发射低							返修3号	58636	管内出气
04E005	105730	主动下线	06B017	55776	窗漏	13H028	26962	窗漏	2017-1	2980	管内出气
04F008	79104	被动下线	06C018	24360	窗漏	13E027	57058	窗漏	返修1号	4546	管内出气
04F007A	68578	主动下线	06E019	70896	被动下线						
04G009A	98578	主动下线	06F020	96802	主动下线	14L030	36624	窗漏			
04G022	14016	窗漏									
04L012	60096	窗漏				15C031	65972	窗漏			
04M013	87778	主动下线									

下线原因	数量
管内出气	6
窗漏	13
发射低	2
主动下线	8
被动下线	2

国产速调管



速调管寿命评估分析

● 寿命评估

■ 未来1年（3支）

--进口15#，超过80000小时，国产3#和13#号超过60000小时，需要关注。

■ 未来3年（6支）

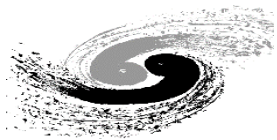
--进口6#、13#、14#、16#超过70000小时，国产3#、8#超60000小时，需要关注。

● 购买建议

■ 现有备件：1支国产+1支进口

■ 考虑BII-U新增一套功率源，2025购买2支（1进口+1国产），2026购买1支（1进口+1国产），2027年购买3支（国产）。

位置	型号	运行时长 (h)	未来1年	未来三年
1#	三菱2018-1	41480	47980	60980
2#	佳能21H110	20960	27460	40460
3#	汉光2017-3	57992	64492	77492
4#	佳能21J111	20960	27460	40460
5#	东芝22A113	27872	34372	47372
6A#	东芝22B115	6608	13108	26108
6#	三菱2017-1	50720	57220	70220
7#	三菱2018-3	21912	28412	41412
8A#	汉光202101	17168	23668	36668
8#	翻修 19	43040	49540	62540
9A#	东芝11F021	101994	2025暑期更换	
9#	汉光2021-2	22400	28900	41900
10#	三菱2018-2	35816	42316	55316
11A#	东芝11H024	100410	2025暑期更换	
11#	汉光2018-2	34640	41140	54140
12A#	东芝22E116	6648	13148	26148
12#	汉光202303	3180	9680	22680
13A#	汉光202201	13392	19892	32892
13#	汉光2017-2	56312	62812	75812
14#	三菱2017-4	53132	59632	72632
15#	东芝13J029	78618	85118	98118
16#	三菱2017-2	57824	64324	77324



速调管导流系数监测

• 导流系数监测：

- **周期监测：**及时准确了解速调管的运行状态，每周对速调管导流系数进行监测，历史曲线如图；
- **模式切换监测：**模式切换，停机前对速调管工作点进行测量。





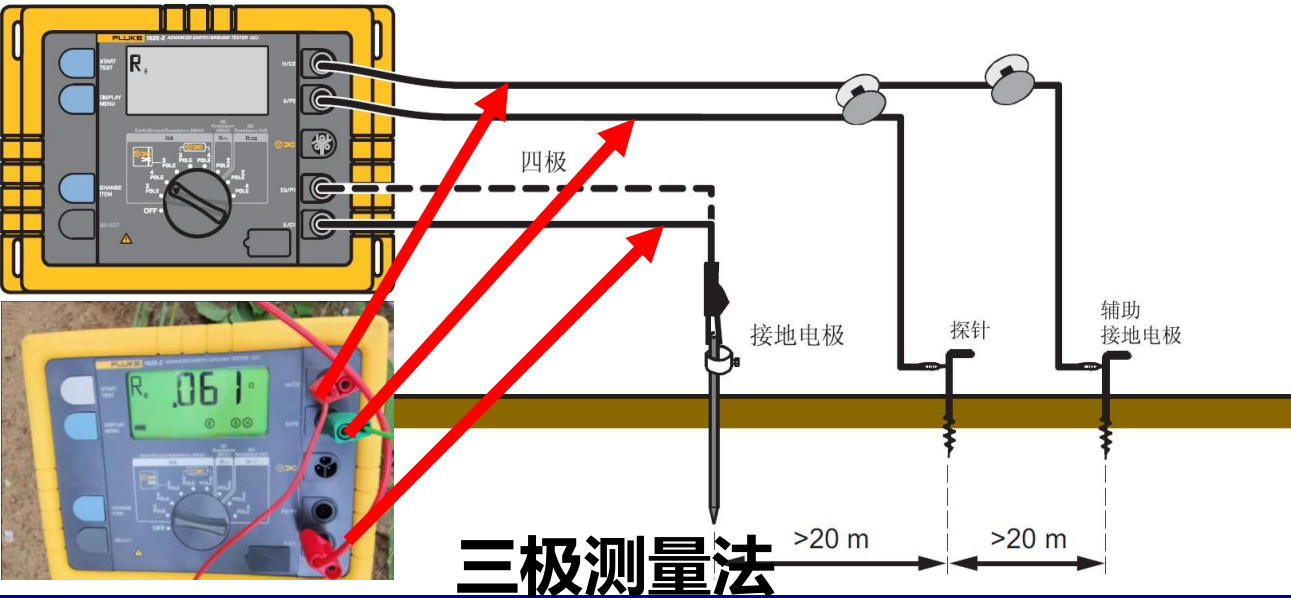
接地有效性测量

• 接地系统的有效性

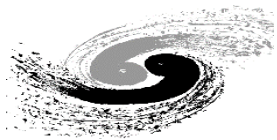
- 接地系统有效性易引起控制干扰;
- 2020年完成15#, 16#, e+脉冲电源接地系统改造;
- 2024年暑期完成9A#, 9#, 11#, 12#接地系统改造;
- 改造前0.19Ω, 改造后0.08Ω;
- 每年暑期核查接地系统的有效性。

年度	15#	16#	e+
2021	0.061Ω	0.059Ω	0.076Ω
2022	0.065Ω	0.069Ω	0.08Ω
2023	0.070Ω	0.069Ω	0.085Ω
2024	0.070Ω	0.070Ω	0.093Ω
2025	0.088Ω	0.053Ω	0.064Ω

接地阻抗每年增长3%至5%



总结与展望



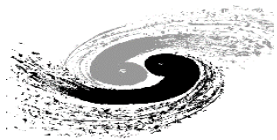
总结与展望

• 总结

- 电子枪、调制器、速调管、正电子源、高功率测试台，**维护任务重**
- 设备涵盖BEPC、BEPCII、BII升能、BII-U多个时期，**时间跨度大**
- 涉及电真空、高功率强脉冲有源设备、高电压设备等，**固有故障率较高**
- **预判故障、可靠性提升、设备升级等措施保持多年极低故障率**
- **目前设备数量（BII、HEPS、PWFA...）逐年增加，人才队伍面临断层风险**

• 展望

- 继续大力推动运行设备国产化进程
- 继续细化设备运行工作、做细、做透
- 继续深入设备可靠性提升工作，继续深入故障预警研究
- 为其他工程建设（HEPS、CEPC）积累经验



感谢！