



# CEPC Klystron development progress in EDR

周祖圣

高功率&高效率速调管研制团队



中国科学院高能物理研究所  
*Institute of High Energy Physics*  
*Chinese Academy of Sciences*

# 主要内容

## ■ 工作进展

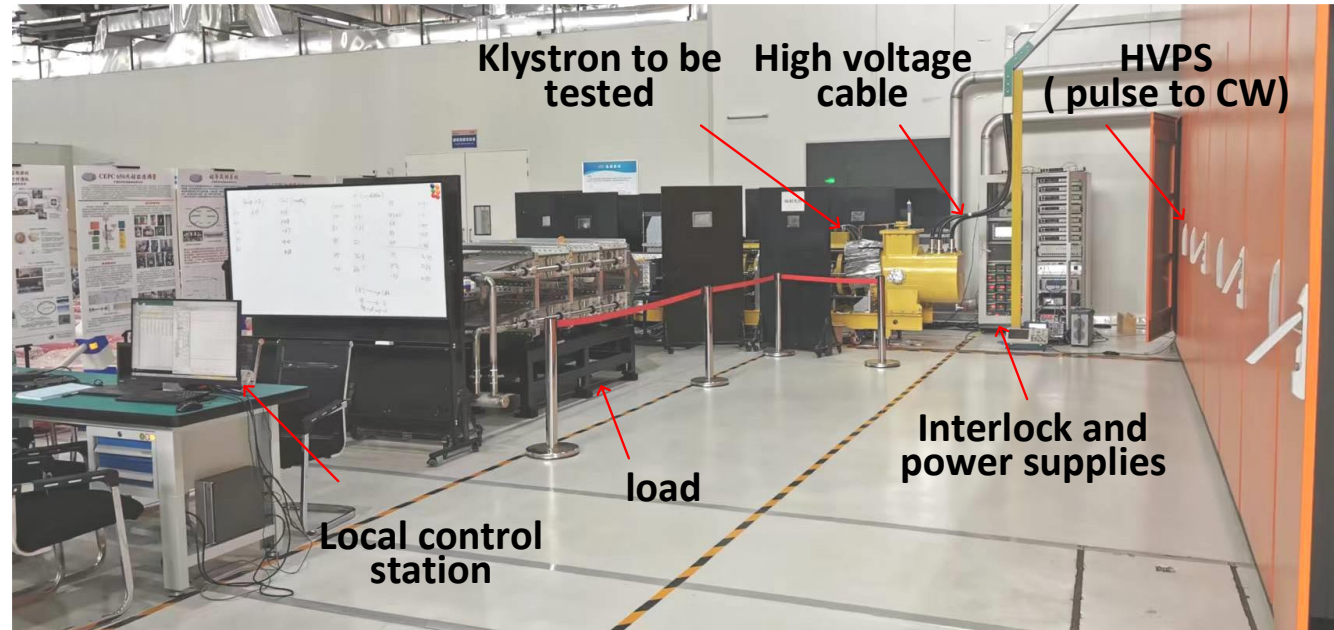
- 高效率样管测试
- 多注速调管 (MBK) 加工
- 0-1课题进展
- 能量回收型速调管设计
- C波段速调管
- 超导腔水平测试配套
  - 长电缆打火保护
  - 低电平控制
  - 功率分配与传输系统

## ■ 下一步计划

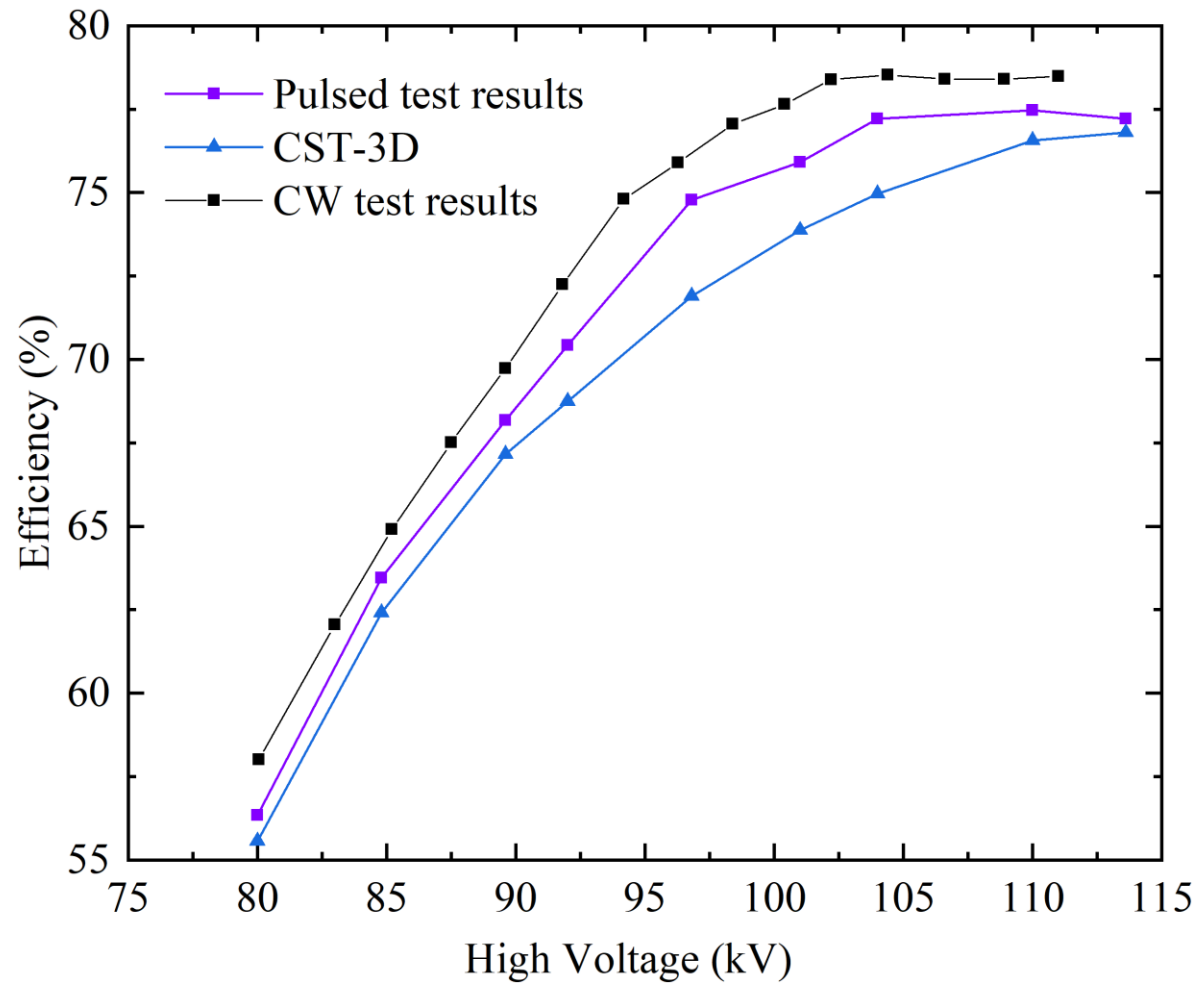
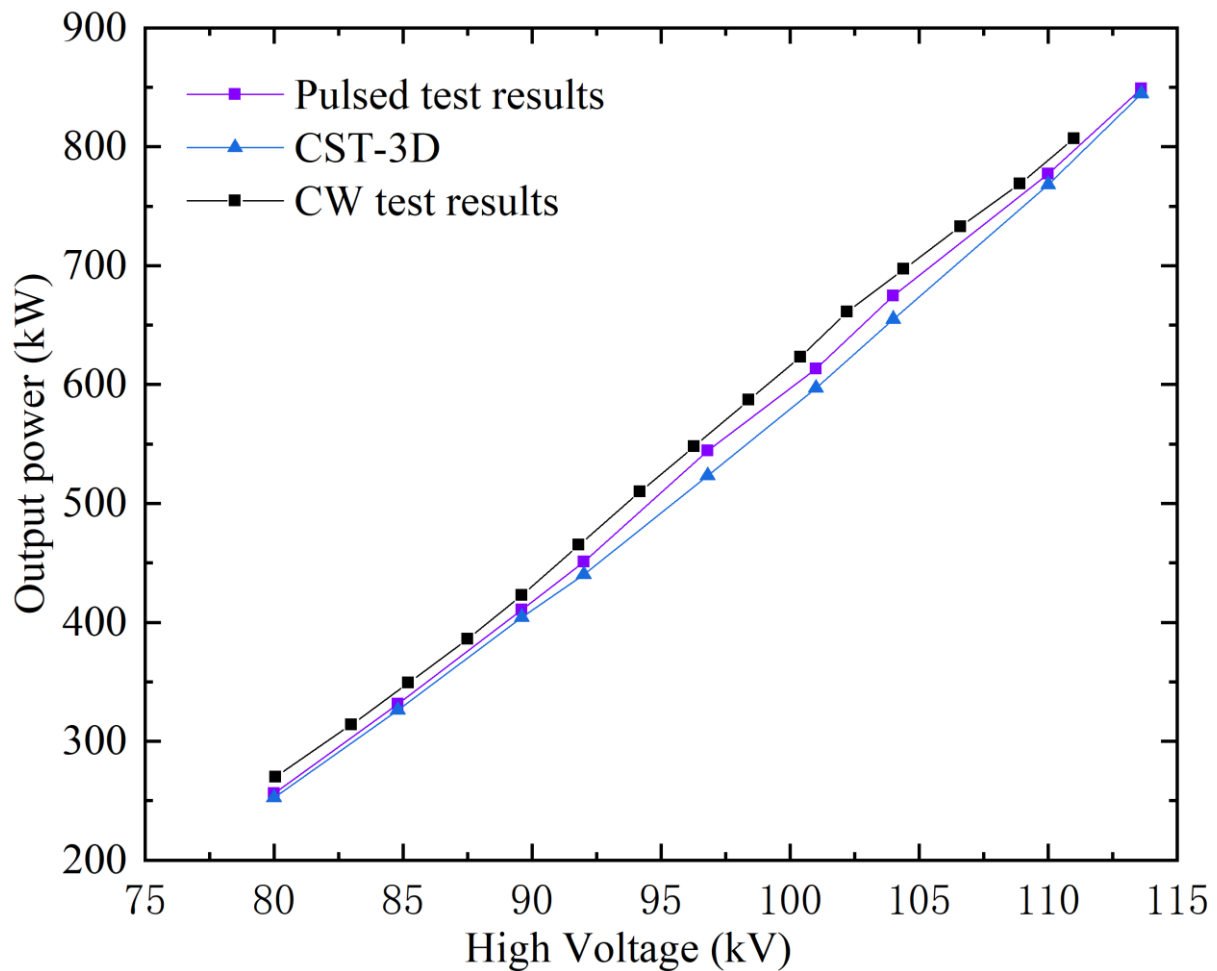
# 1. 高效率速调管测试

## 主要时间点

- 01月11日：速调管运抵怀柔现场；
- 02月02日：专家组测试（脉冲模式）
- 06月03日：复现2月测试结果
- 06月18日：10%占空比-满功率
- 07月10日：50%占空比-满功率
- 07月15日：连续波-600kW
- 07月16日：连续波-700kW
- 07月23日：连续波-800kW（max. 809kW）



# 测试结果

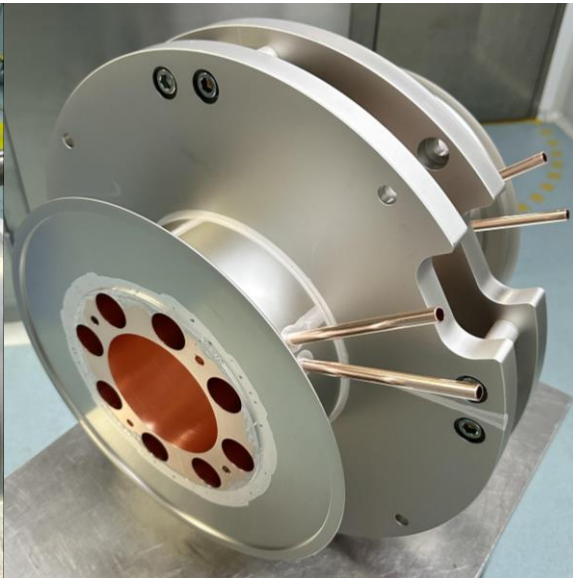


## 2.多注速调管(MBK)加工

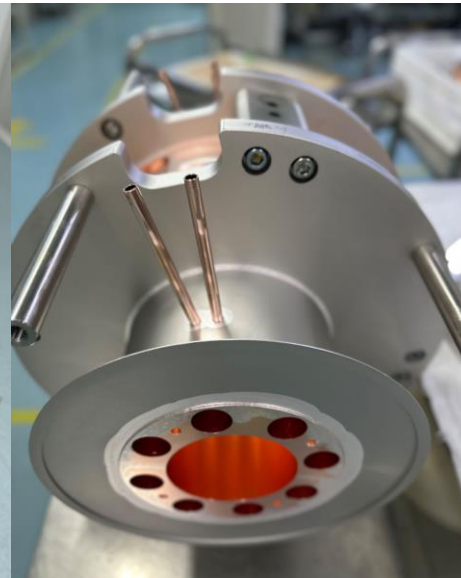
- 截止到7月25日，MBK速调管3号、4号、5号、6号腔已经完成了焊接、检漏和调谐工作，7号腔在零件还在加工中，预计8月初完成零件加工。



3号腔



4号腔



5号腔



6号腔

# 多注速调管(MBK)加工

- 目前已经研制好的各腔体参数情况如下表:

腔体序号	2号腔	3号腔	4号腔	5号腔	6号腔
设计频率 (MHz)	651.2	1296	1942.5	670	671
焊接前测量频率 (MHz)	651.237	1303.99	1936.875	666.9375	670.3125
焊接后测量频率 (MHz)	649.375	1290.5	1937.4719	667.21875	669.7356
调谐后测量频率 (MHz)	651.1625	1295.75	1942.3249	669.8125	670.7325
进行温湿度矫正后设计频率 (MHz)	651.108	1295.624	1941.983	669.819	670.844

18°C RH% 45%    22°C RH% 56%    21°C RH% 52%    21.5°C RH% 47%    20°C RH% 38%

2023/2/17    2024/5/30    2024/7/23    2024/6/21    2024/5/6

# 3. 0-1课题-能量回收电源

## ■ 能量回收电源主要时间点：

- 23年06月02日签订课题任务书
- 23年06月20日设计方案评审
- 23年10月16日实施方案评审
- 23年11月10日合同签订
- 24年03月21日出厂测试评审
- 24年04月23日运抵高能所
- 24年05月07日完成现场验收

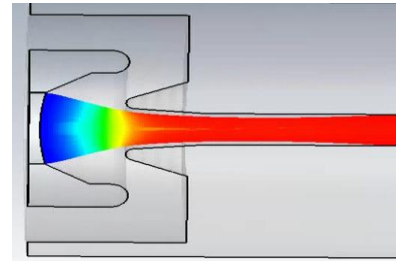
项目	阴极电源	收集极电源	灯丝电源
输出电压	-15kV~-30kV	1500V~3000V	-10~-15V
输出平均电流	≤200mA	≤4.5A	≤40A
稳定度	≤ 10 <sup>-3</sup>	≤ 10 <sup>-2</sup>	≤ 10 <sup>-2</sup>
输出纹波	≤ 10 <sup>-3</sup>	≤ 10 <sup>-3</sup>	≤ 10 <sup>-2</sup>



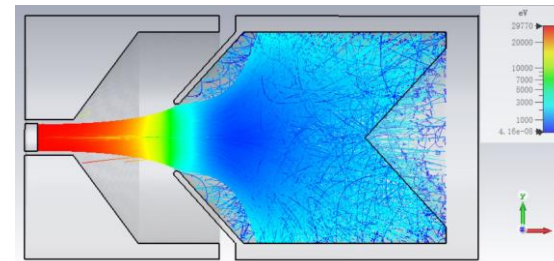
# 收集极样机

## 收集极样机主要时间点:

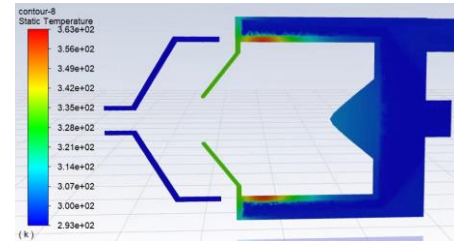
- 23年06月完成电子枪设计
- 23年09月完成收集极设计
- 23年10月完成冷却系统设计
- 23年12月完成样机陶瓷绝缘结构设计
- 23年12月完成机械机构设计
- 24年03月启动机械加工
- 24年06月完成整体装配和排气
- 24年07月03日运抵高能所



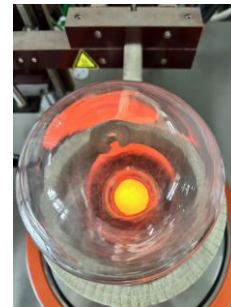
验证样机电子枪



收集极束流光学



水冷系统热分析



阴极激活



电子枪阴极及聚焦极焊接



排气炉排气



样机到货开箱检查



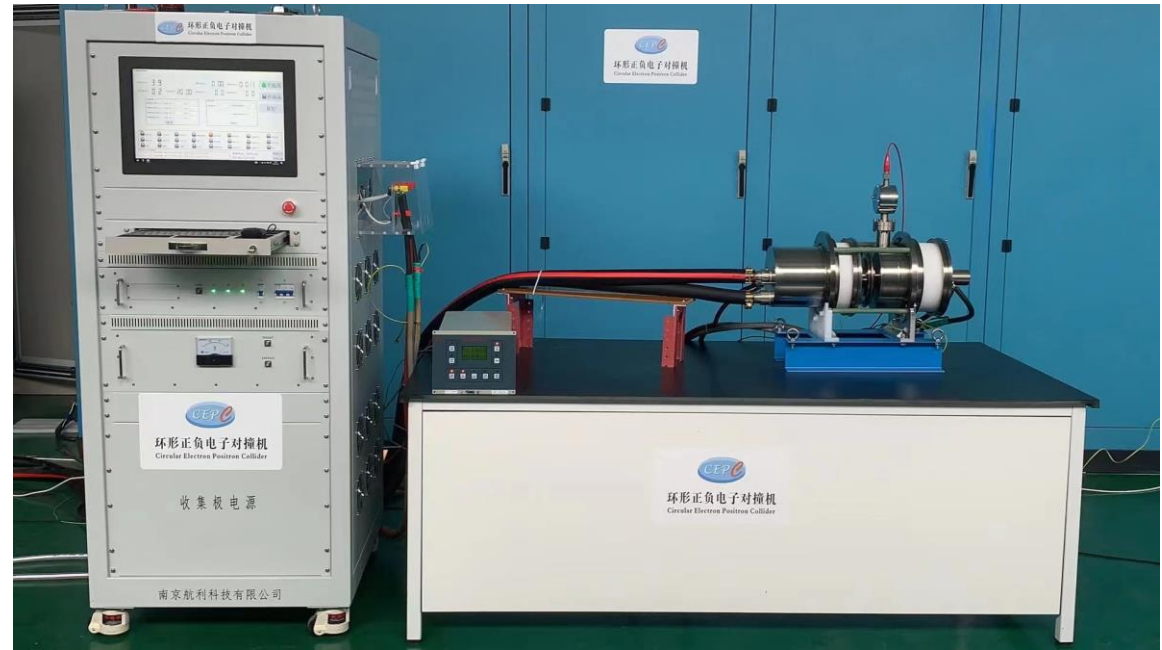
样机到货真空情况



# 能量回收样机

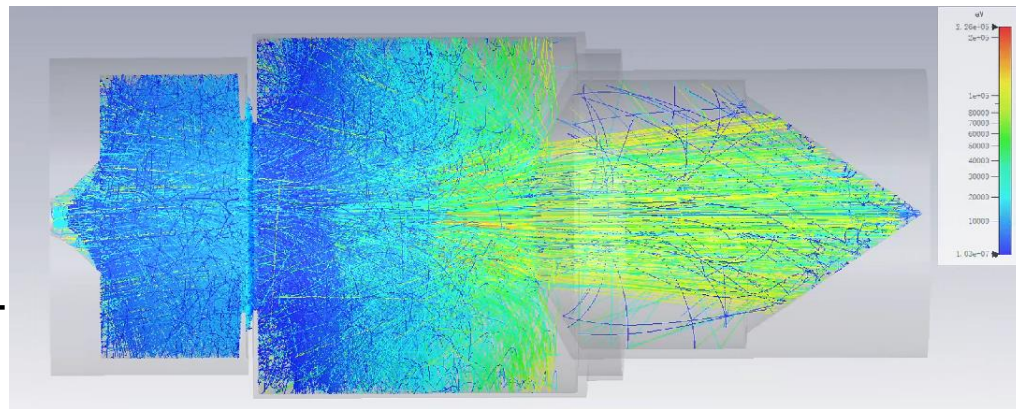
## ■ 能量回收型样机测试准备：

- 完成冷高压老练，真空正常
- 完成测试平台搭建（水、电、流量、温度、离子流等联锁控制）
- 完成阴极灯丝加电
- 正在进行加高压实验

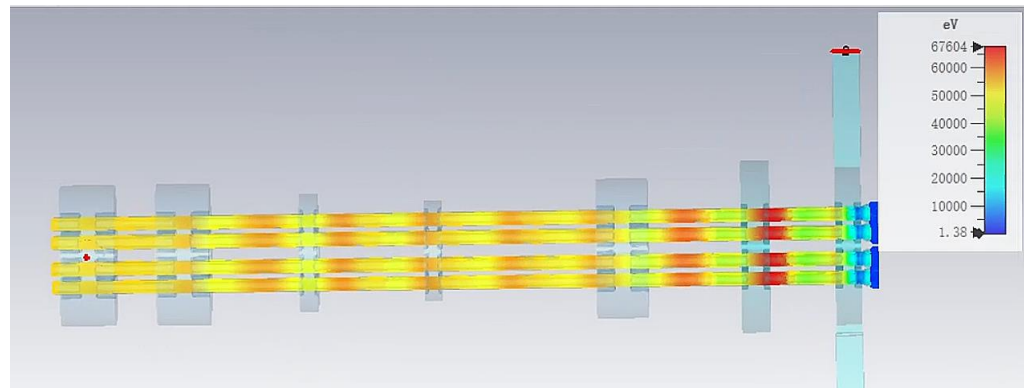


# 4. 能量回收型速调管设计

- 单注能量回收型速调管设计：
  - 完成理论分析，获得初步设计参数
  - 完成三维仿真，获得初步结构参数
  - 下一步将继续结构优化，完成冷却及绝缘设计
- 多注能量回收型速调管设计：
  - 通过数据分析，获得初步设计参数
  - 正进行束流动力学模拟



单柱能量回收型速调管仿真结果



多柱能量回收型速调管初步仿真结果

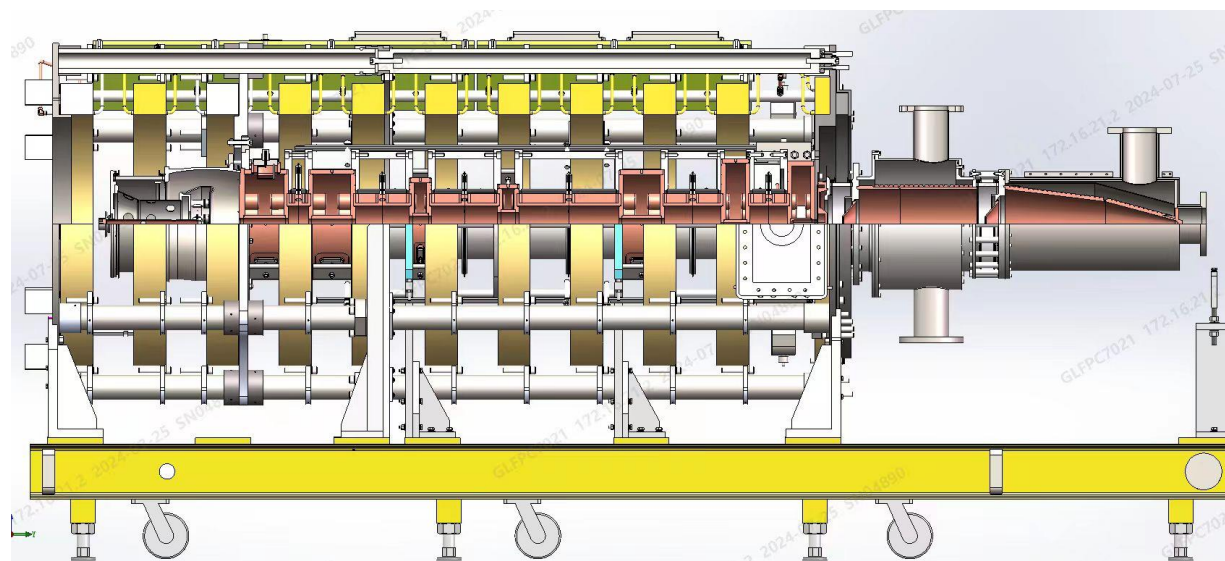
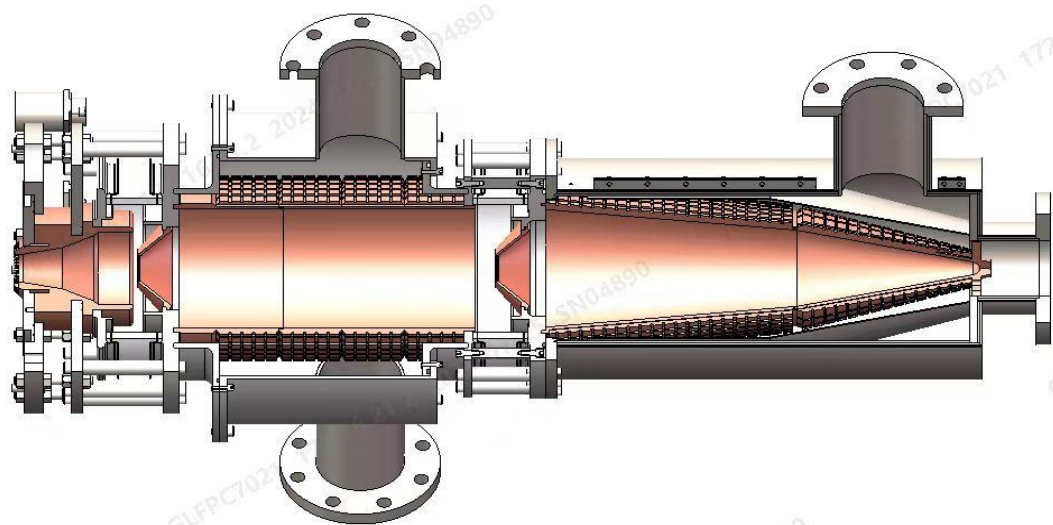
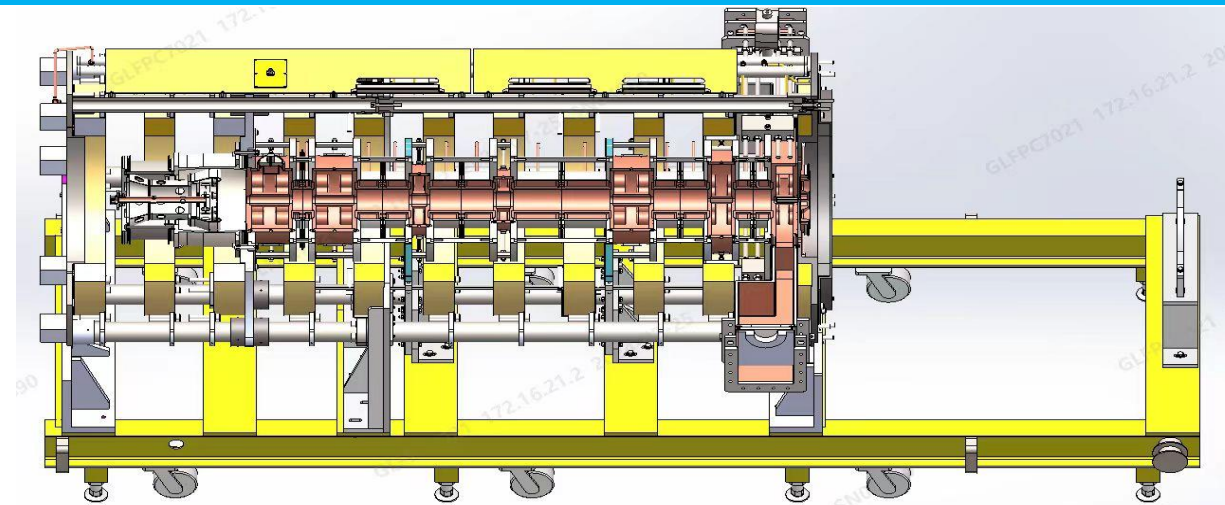
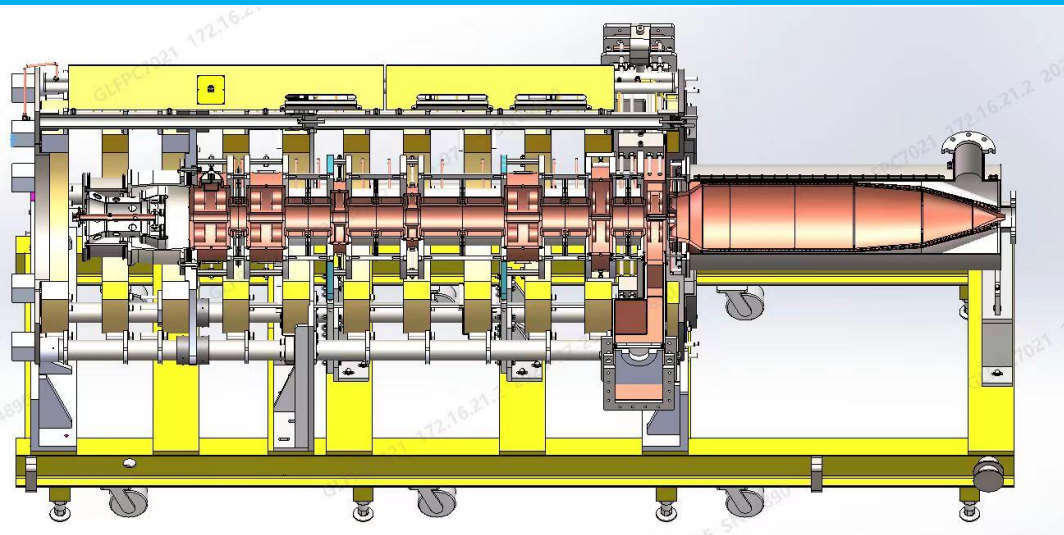
# 设计比较

以输出功率700kW，速调管在线性区实际工作效率-----**65%**

650MHz单注高效率速调管		
级数	效率	各极电位
单极降压	72.92%	17.3kV
二极降压	79.38%	17.2kV <b>113kV</b>
三极降压	82.95%	16.7kV 33.9kV <b>113kV</b>

650MHz多注速调管		
级数	效率	各极电位
单极降压	75.16%	29.5kV
二极降压	81.46%	17.7kV <b>54kV</b>
三极降压	86.10%	6.8kV 24.2kV <b>54kV</b>

# 能量回收型速调管 (多注)



# 能量回收型速调管用高压电源

## ■ 能量回收型速调管用高压电源

- 采用多路高压电源并联工作模式，每路高压电源采用LCC电源拓扑形式，每个电源模块最大功率在100kW
- 输出参数：120kV/1A, 60kV/2A
- 可用于单注高效率速调管、多注速调管，单注能量回收型速调管和多注能量回收型速调管等多种管型的测试
- 初步设计已完成，下一步将细化方案后进行设计评审

# 5. C波段高脉冲速调管

## ■ 物理设计

- 5月12日邀请所内外相关专家进行了物理设计评审。设计方案合理可行，设计结果达到预期目标，可进行下一步的结构和工艺设计。
- 结构和工艺设计已基本完成，将协调相关专家时间后进行评审。

### C 波段 80MW 脉冲速调管物理设计 评审意见

2024 年 5 月 12 日，CEPC 项目组在高能所组织召开 C 波段 (5712MHz)80MW 脉冲速调管物理设计评审会（现场+视频）。来自中国科学院空天信息创新研究院、电子科技大学、东南大学、中国科学院上海高等研究院、中国原子能科学研究院和中国科学院高能物理研究所等 9 位专家（名单见附件），听取了项目组作的《Design of gun, magnet and collector for C band 80MW klystron》和《Beam dynamic design for C band 80MW klystron》报告。经质询和认真讨论，专家组提出如下建议：

- 1、优化高频相互作用段的设计，研究进一步提高效率和功率的可能性。
- 2、考虑收集极二次电子返流对速调管稳定性的影响。
- 3、研究谐振腔高次模对速调管性能的影响。

专家组认为：设计方案合理可行，设计结果达到预期目标，可进行下一步的结构和工艺设计。

评审组长：



日期：2024年5月12日

### C 波段 80MW 速调管物理设计评审 会议日程

会议时间：2024 年 5 月 12 日（周日）14:00

会议地点：中国科学院高能物理研究所 2#厅 2 楼会议室

Zoom Meeting ID: 95338275315, Password: 000000

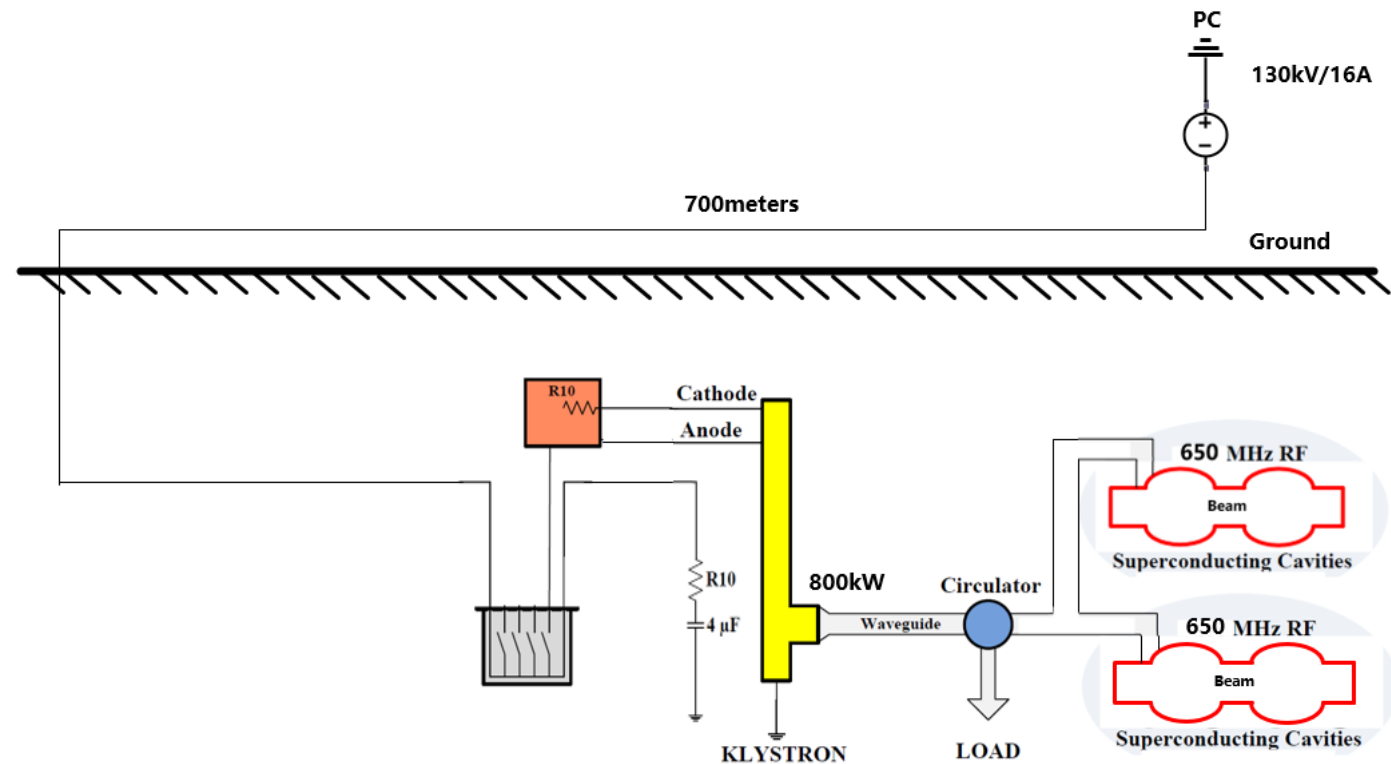
时 间	内 容	报告人	主持人
14:00~14:10	领导讲话及介绍评审专家		周祖圣
14:10~14:40	Design of gun, magnet and collector for C band 80MW klystron	Munaware Iqbal	专家组组长
14:40~15:10	Beam dynamic design for C band 80MW klystron	Abid Aleem	
15:10~16:30	讨论并形成评审意见		

#### 评审专家：

丁耀根 研究员 中国科学院空天信息创新研究院  
段兆云 教 授 电子科技大学  
王琦龙 教 授 东南大学  
刘 波 研究员 中国科学院上海高等研究院  
杨京鹤 正高级工程师 中国原子能科学研究院  
高 杰 研究员 中国科学院高能物理研究所  
裴国玺 研究员 中国科学院高能物理研究所  
李京祎 研究员 中国科学院高能物理研究所  
张敬如 研究员 中国科学院高能物理研究所

# 6. 超导腔水平测试配套-长电缆打火保护

- 基于650MHz超导腔测试平台
  - PAPS C厅 (速调管位置) -A厅 (水平测试坑) 约80m
- 打火保护技术参数
  - 耐压等级120kV;
  - 响应时间:  $\leq 5\mu\text{s}$ ;
  - 能量限制:  $\leq 10\text{J}$ ;



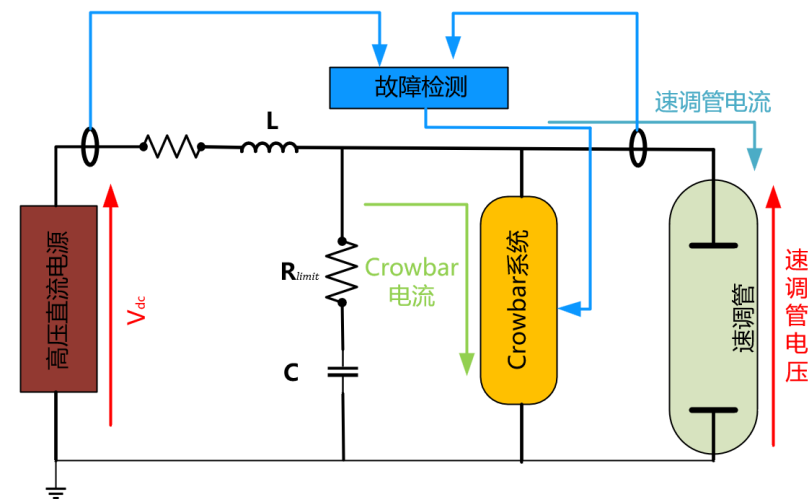
CEPC TDR CW速调管结构布局示意图

# 长电缆打火保护

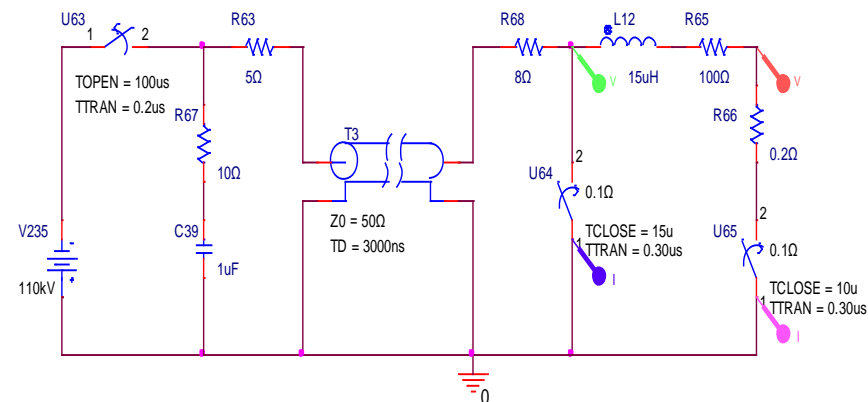
## ■ 完成技术方案设计

- 在速调管一端并联Crowbar，在速调管打火，迅速触发Crowbar，将能量瞬间旁路泄放掉
- 完成长距离传输电缆分布电容放电能量分析
- 完成PSM高压直流电源放电仿真及测试
- 完成系统建模及系统仿真、能量计算及验证方法设计
- 将协调专家时间，尽快完成方案评审，进行实验验证

电缆长度	12.5m	50m	80m	100m	200m	300m	600m	1000m
电缆储能	9.6J	38J	61J	76J	153J	230J	460J	766J



高压直流长距离传输打火保护结构示意图



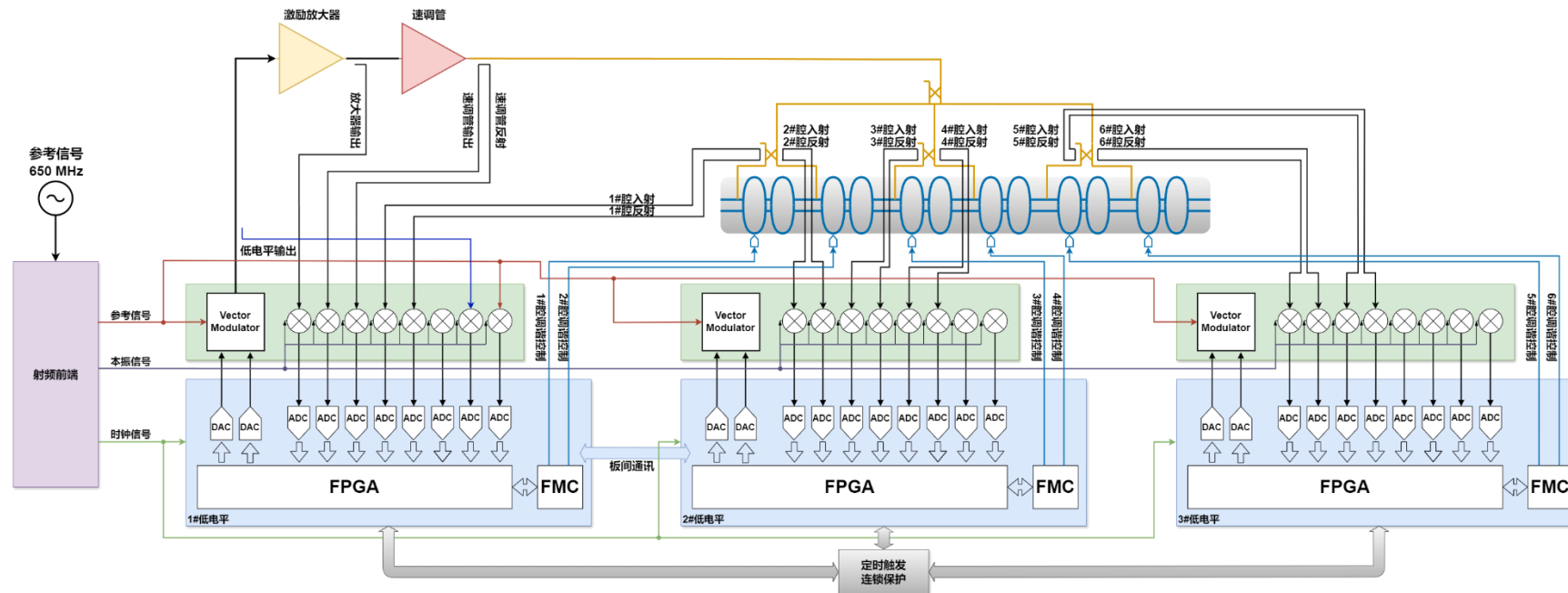
系统建模及仿真



# 低电平控制系统

## ■ 方案设计：

- 6个2-cell超导腔由一套速调管功率源系统驱动
- 低电平系统采用国产MicroTCA平台，包含3套控制板卡
- 采用基于矢量和的多腔控制算法，实现一套功率源驱动下6个超导腔幅度相位频率的同步控制



# 低电平控制系统

## ■ 研制进展：

### – 软件

- 完成了国产低电平控制板卡底层固件的开发
- 正在进行低电平算法的移植、多腔控制算法的研发、上层EPICS应用的开发

### – 硬件

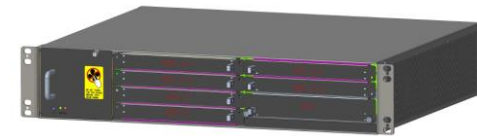
- 完成了超导腔调谐控制板卡的调研与采购，正在进行板间通讯程序的开发与调试
- 机箱电源、CPU板卡、FPGA控制板卡等国产MicroTCA硬件已完成研发，正在开始采购流程



超导腔调谐控制板卡



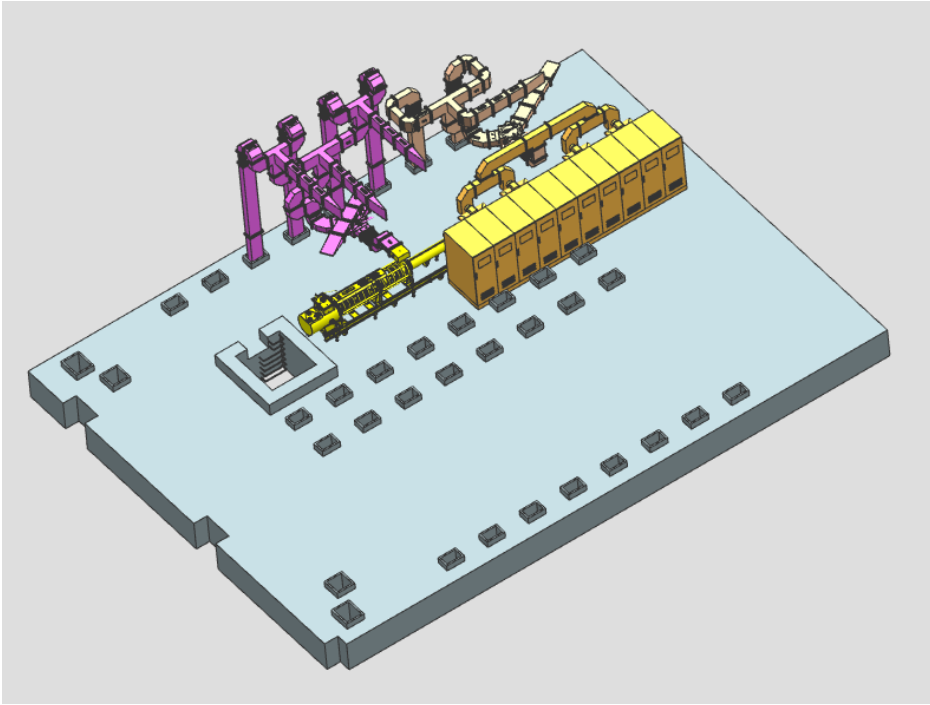
调谐控制子卡



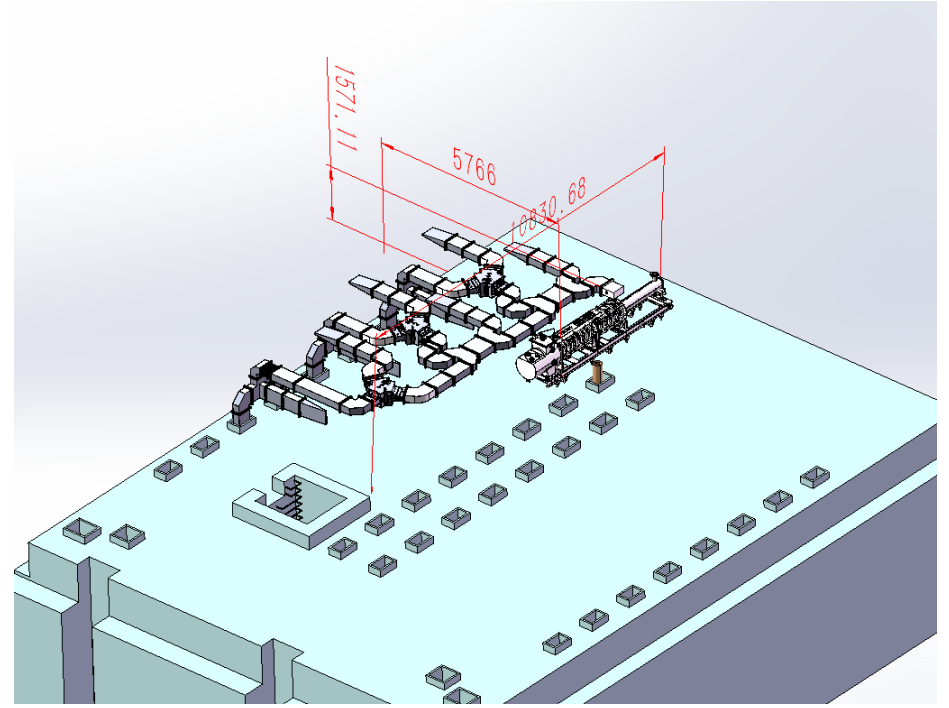
部分国产化MicroTCA硬件

# 功率分配与传输系统

- 基于PAPS 2A厅屏蔽间顶部空间，进行相关功率分配及传输系统布局
  - 3月布局——由速调管1to4&固放1to2
  - 8月布局——速调管1带6超导腔，将尽快进行方案评审。



3月方案



8月方案

# 下一步计划

- 650MHz高效率样管高功率测试、验收or鉴定
- 650MHz高效率速调管量产实施方案评审和样管研制情况总结
  - 优化输出腔结构，提高电子注填充因子，提高电子枪高压
  - 完善剂量屏蔽/腔体频率控制.....
- C波段速调管机械与工艺设计评审
- 完成MBK加工及高功率测试准备
- 完成基于MBK进行能量回收速调管物理设计
- 完成P波段和C波段谐振环研制
- 完成超导腔水平测试配套国产低电平、打火保护、功率分配与传输等研制

谢谢大家