



环形正负电子对撞机
Circular Electron Positron Collider

CEPC对撞区超导磁铁 冷却方案设计

Miaofu Xu, Penghui Li,
2023-03-30

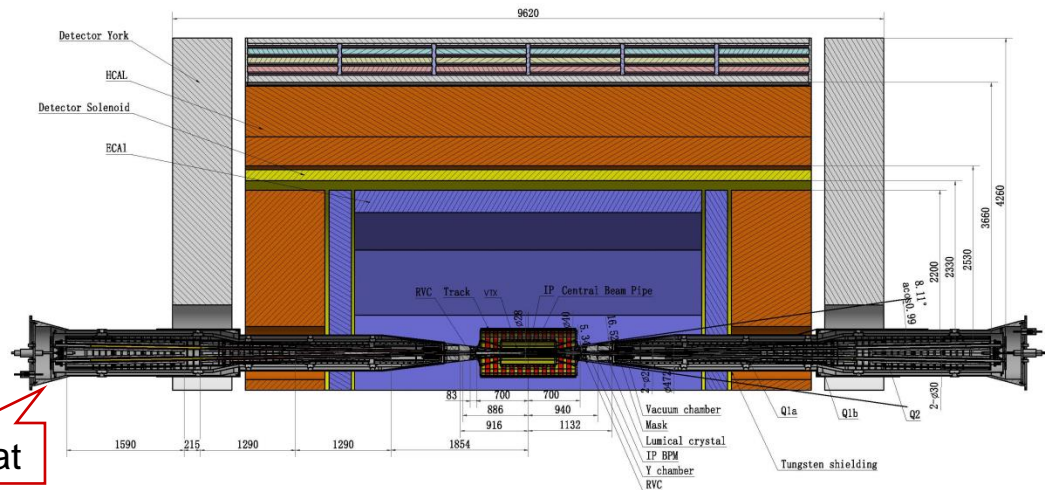
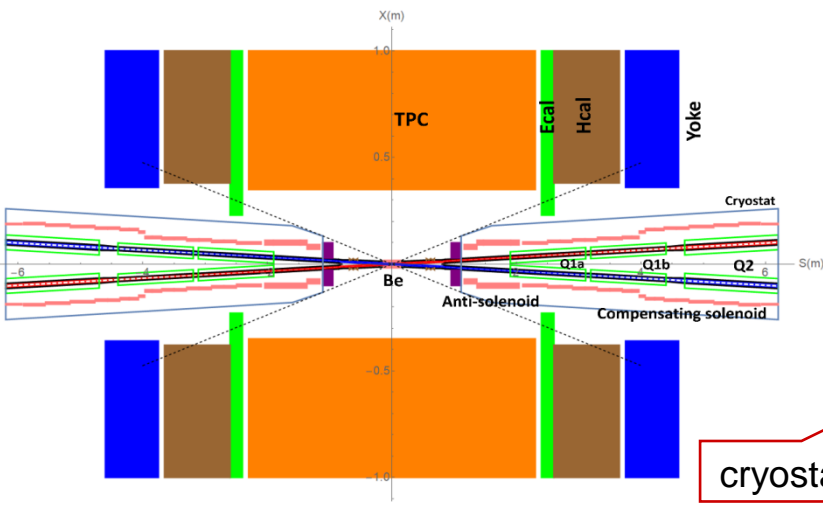
Cryogenics Group, Accelerator Research Center
Institute of High Energy Physics(IHEP)
Email: xumf@ihep.ac.cn



1. 研制背景和相关要求
2. 超导磁铁冷却方案
3. 低温恒温器的机械结构设计
4. 强度校核计算和温度场数值模拟
5. 总结和下一步计划

Introduction

- CEPC的设计束流能量是120Gev，结构设计需要考虑辐射剂量、束损和热沉积的影响
- 低温恒温器的设计长度是5.5米---内外支撑结构、挠度、冷却流道、热负荷、准直
- 采用带氦循环泵的大流量迫流冷却方案，结构上采用内外两层冷屏结构
- CEPC-MDI对撞区组合型超导磁铁低温恒温器是核心设备之一，研制过程极具挑战性



cryostat

Basic Parameter of SC Magnet

The requirements of the Final Focus quadrupoles(Q1a、 Q1b、 Q2 and Anti-Solenoids) are based on the length of 5 m, beam crossing angle of 33 mrad in the interaction region

ITEM	Q1a	Q1b	Q2	Anti-Solenoids
Central field gradient (T/m)	142.3	85.5	97.7	8.6
Cooling type	LHe	LHe	LHe	LHe
Operating current (A)	2020	1590	1925	1300
Magnetic storage energy (KJ)	11.5	11.06	31.12	715
Operating temperature (K)	4.5K	4.5K	4.5K	4.5K
Magnet length (m)	1.211	1.211	1.502	5.1
X direction Lorentz force/octant(kN)	62.33	45.86	126.94	
Y direction Lorentz force/octant(kN)	-58.59	-44.69	-112.68	
Net weight (kg)	96	126	235	302



1. 研制背景和相关要求
2. 超导磁铁冷却方案
3. 低温恒温器的机械结构设计
4. 强度校核计算和温度场数值模拟
5. 总结和下一步计划



The Solution of Cryogenic System

1. 美国费米国家实验室的Tevatron质子-反质子对撞机是一台采用超导磁体的加速器，采用**过冷液氦冷却**；
2. 美国布尔海文国家实验室的质子-质子对撞机RHIC超导磁体采用**超临界氦冷却**；
3. 美国康奈尔大学纽曼实验室的正负电子对撞机CESR及其探测器CLEOII，超导磁体采用**过冷氦冷却**，每一个超导四极磁体的低温热负荷为2W；
4. 德国汉堡同步加速器实验室的电子-质子对撞机HERA以温度4.4K的**超临界氦冷却**超导磁体；
5. 欧洲粒子物理中心的强子对撞机LHC使用的是冷却介质为1.8~1.9K的**超流氦**；
6. 日本国家高能物理研究所的正负电子对撞机KEKB的磁体采用1.5bara，4.5K 下的**过冷液氦冷却**。

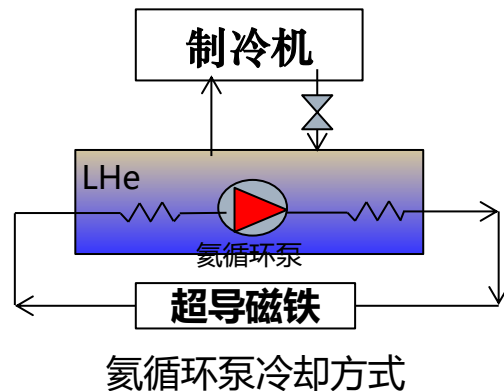
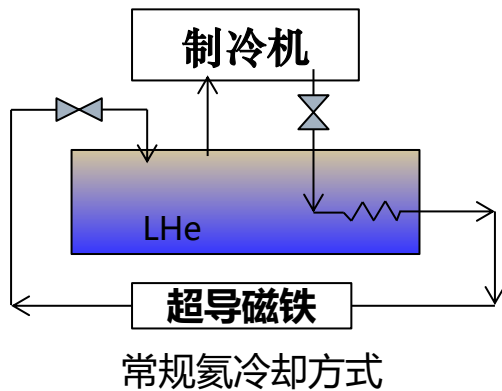
单相液氦冷却有利于减少磁铁失超的发生



The Solution of Cryogenic System

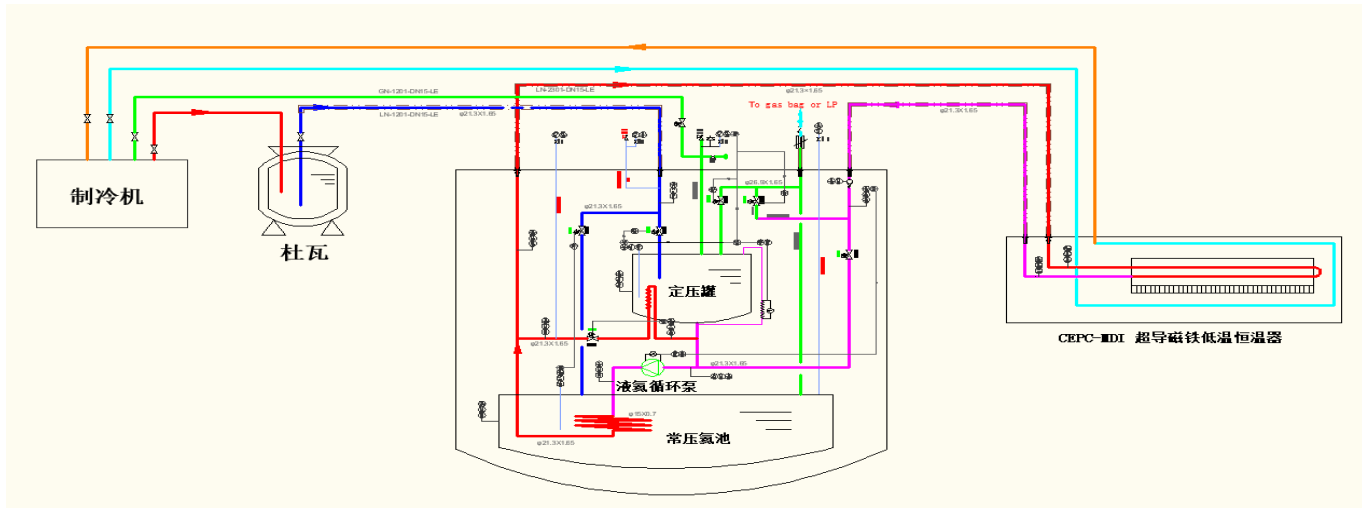
大流量迫流冷却----超临界氦循环泵的应用案例:

1. 德国汉堡电子同步加速器实验室 (DESY) 的电子-质子对撞机HERA, 使用了一台45g/s的氦循环泵
2. 瑞士日内瓦的欧洲联合核子研究中心 (CERN) 的质子-质子对撞机ATLAS-LHC, 使用了两台600g/s的氦循环泵和两台1.2Kg/s的氦循环泵
3. 日本原子能研究所的超导磁体测试装置和德国卡尔斯鲁厄研究中心技术物理研究所的TOSKA





The Solution of Cryogenic System



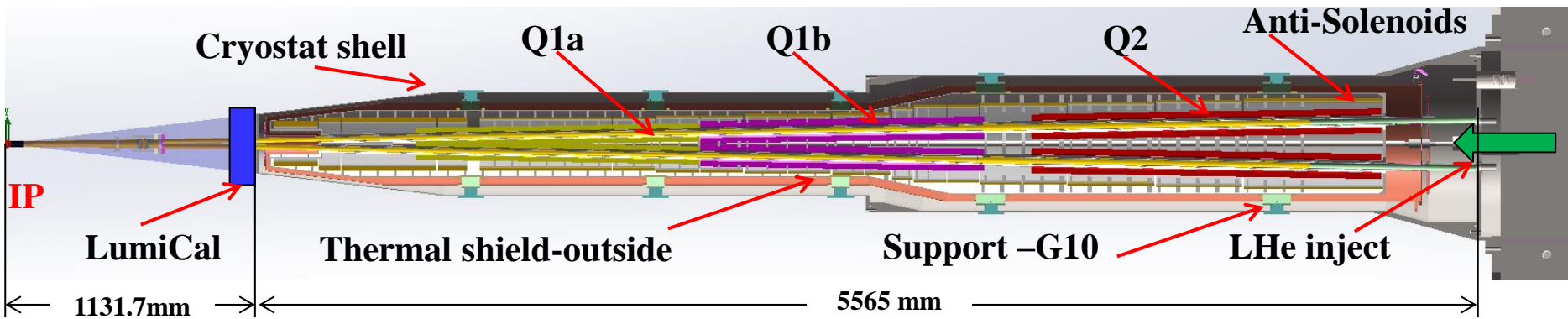
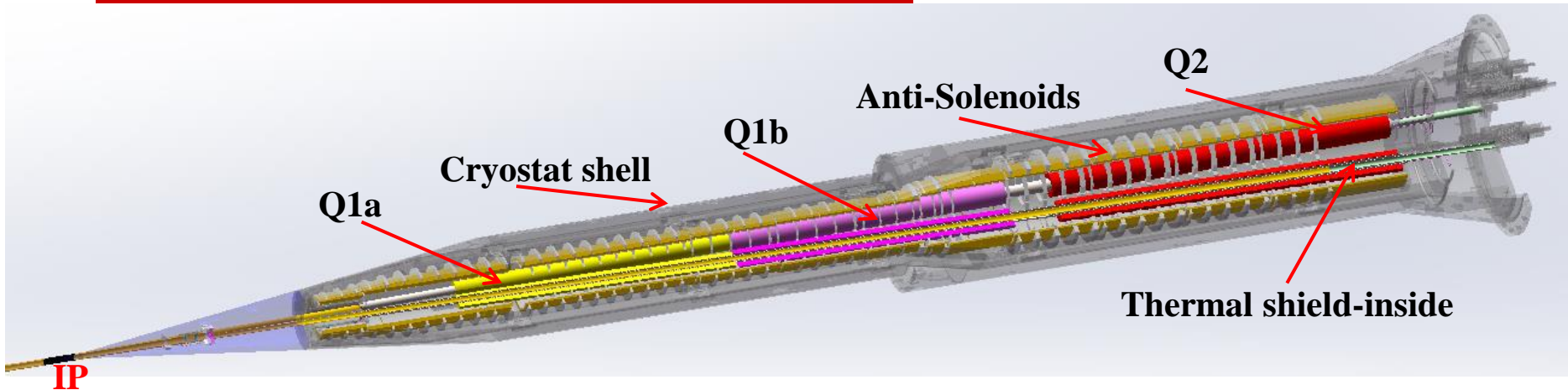
使用液氮循环泵的优点:

1. 可以促进磁体的冷却循环, 加大冷却介质流量以提高超导磁体的冷却效果, 从而提高超导磁体的稳定性。
2. 可以方便的改变磁体冷却循环的冷却介质流量而不需要改变制冷机的节流路流量, 此调节过程中产生的热扰动会首先被液氮槽或过冷槽吸收, 再慢慢地传送到制冷机。
3. 可以提高超导磁体的入口压力, 保证出口冷却介质仍为超临界氦, 从而避免超导磁体内发生两相流。



1. 研制背景和相关要求
2. 超导磁铁冷却方案
3. 低温恒温器的机械结构设计
4. 强度校核计算和温度场数值模拟
5. 总结和下一步计划

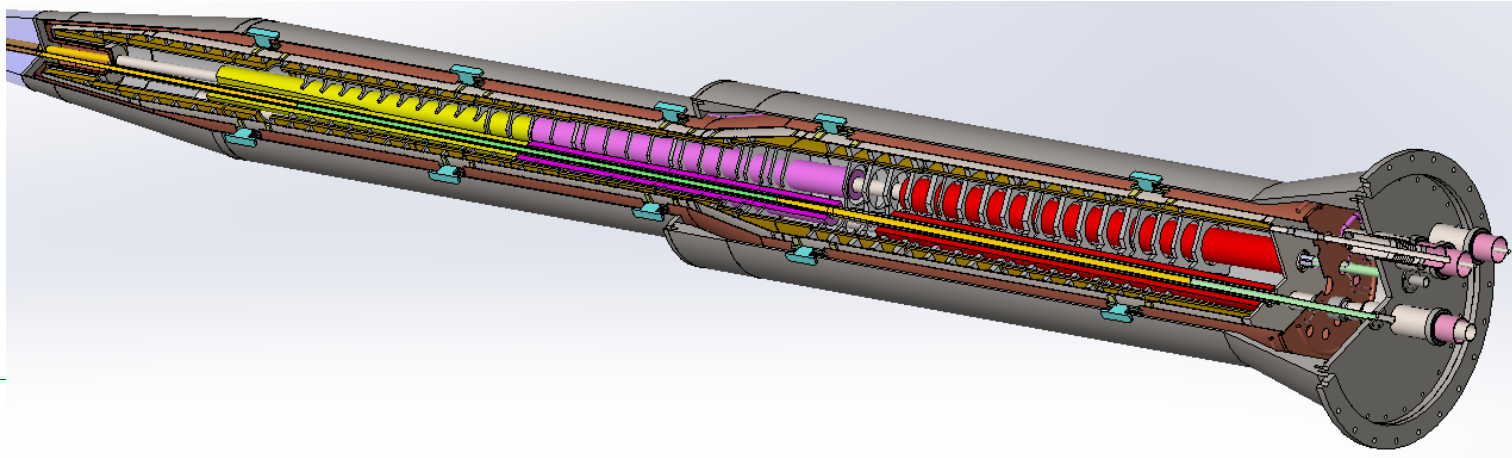
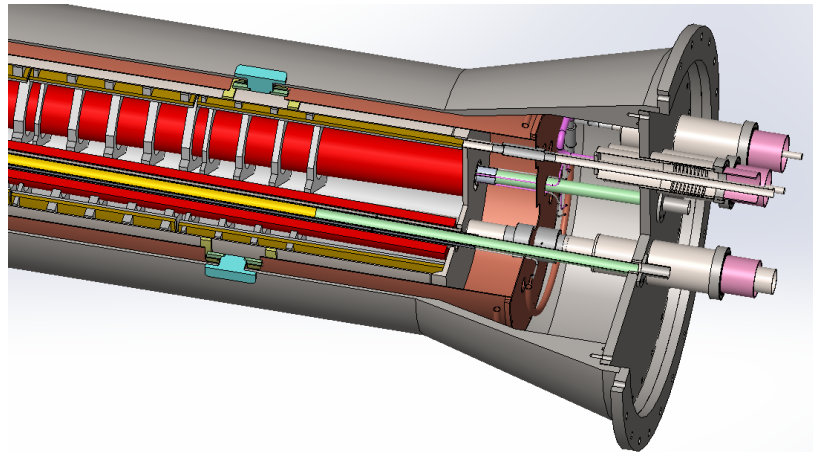
3D view of IR





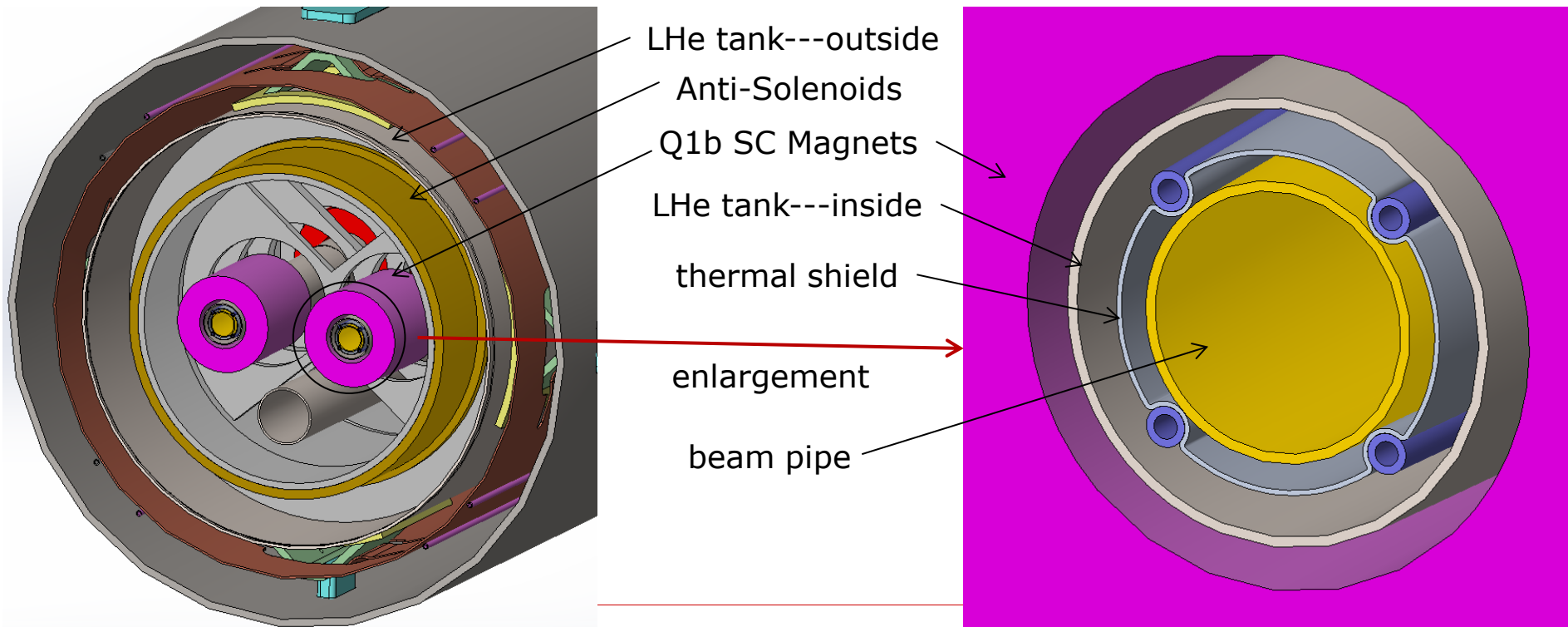
冷屏结构设计-外冷屏

- 冷源选择: LN2/GHe@40K
- 结构形式: 直列式盘管
- 流向: 外冷屏 → 内冷屏
- 支撑结构: K型支撑/拉杆式支撑
- 工艺难点: 焊接电流和焊接变形量的控制
- 绝热材料包扎要求: $< 1.5\text{W}/\text{平方米}$



冷屏结构设计-内冷屏

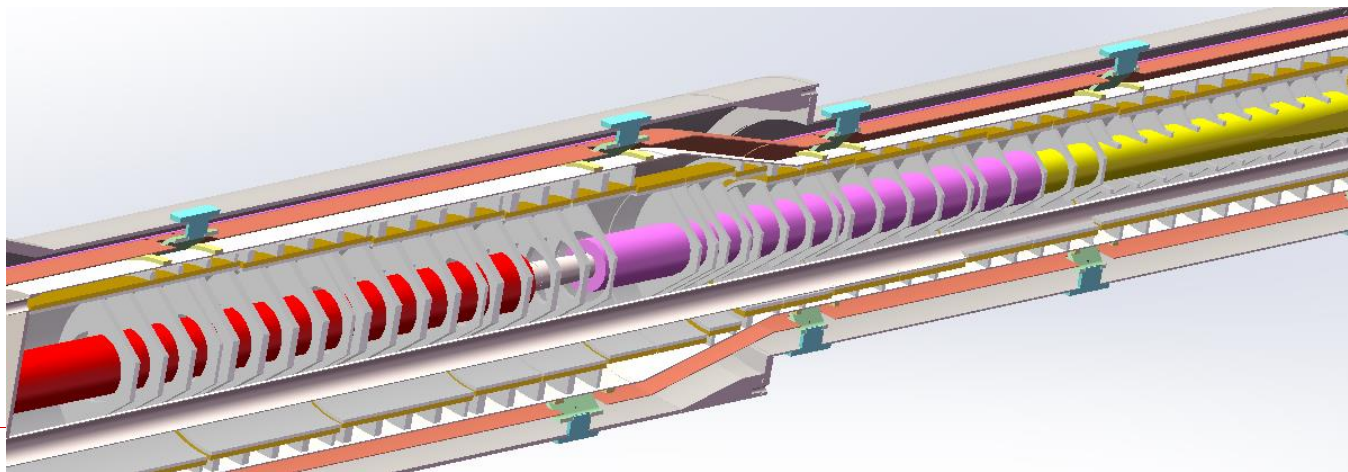
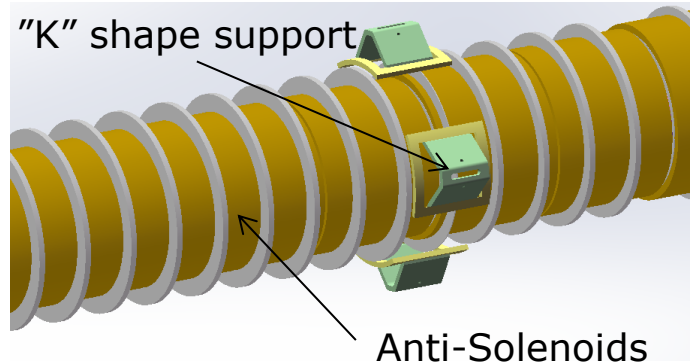
内冷屏作用：减少热负荷；常温束流管；减少束流管道温升对氦池的影响。



Support

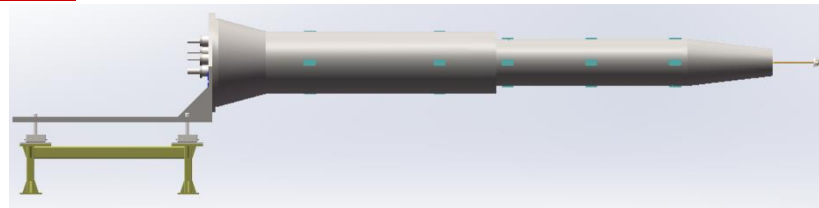
恒温器内支撑结构:

- 氦池采用K型支撑结构支撑于真空室;
- 外冷屏采用螺钉紧固在K型支撑中部, 兼顾热隔断作用;
- 反抵螺线管采用圆环支撑于氦池内壁面;
- 超导磁铁Q1a,Q1b和Q2支撑于反抵螺管组件内壁面;
- 内冷屏用G10环支撑于氦池内筒体。

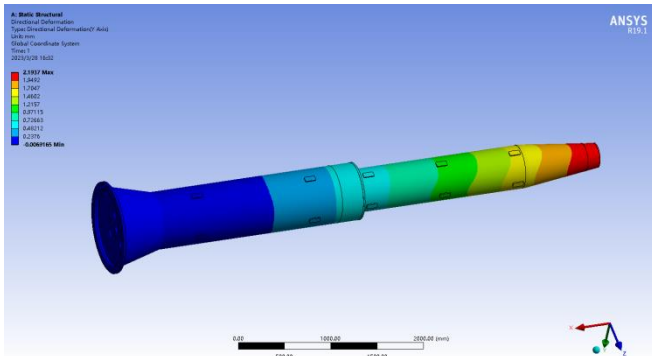


恒温器外支撑结构:

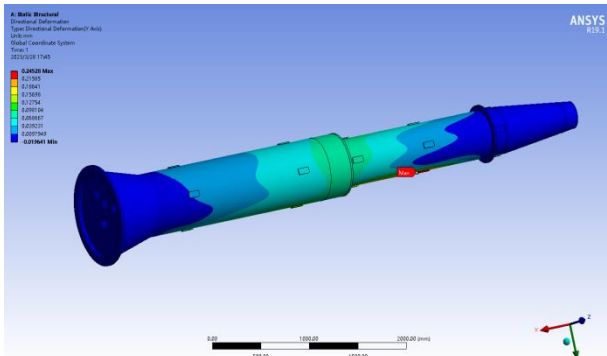
- 悬臂式支撑, 重力方向最大变形量为2.1937mm---偏大
 - 多点支撑:
 - ① 两点支撑: 重力方向最大变形量为0.2453mm
 - ② 三点支撑结构: 重力方向最大变形量为0.2029mm
- 需要结构探测器上的结构设计, 在合理位置设置支撑结构



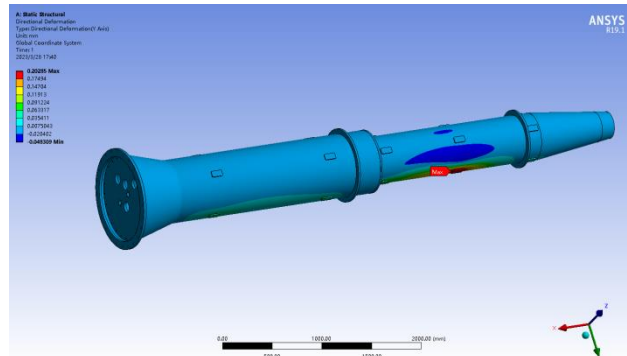
超导磁铁总重量: $96(Q1a)+126(Q1b)+235(Q2)+302(\text{solenoids})=759\text{Kg}$
 冷屏的总重量: $136.22(\text{外冷屏})+2.2(\text{内冷屏})=138.42\text{Kg}$
 冷质量总重量: 921.42Kg ; 计算值 (取1.2安全系数) : 1105.7Kg



悬臂式支撑



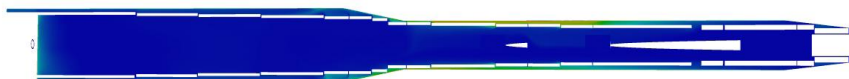
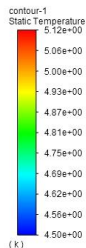
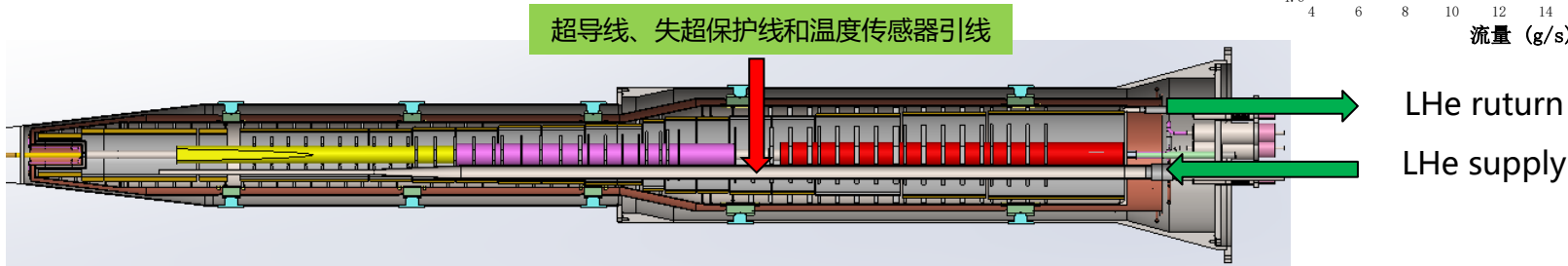
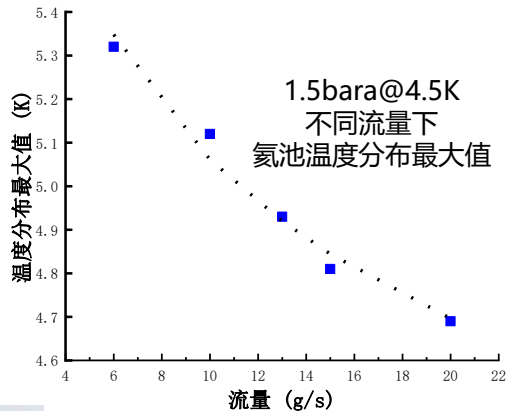
二点式支撑



三点式支撑

流道设计:

- 充分冷却，无死角
- 流阻尽可能小，及时把热量带走
- 进液管沿途均匀开分流孔，尽量避免对超导线薄弱点造成冲击
- 进液管与超导线、失超保护线和温度传感器引线共用一根管道，沿途采用浸泡式冷却



每块Q铁发热2W; 返抵螺线管4W
只考虑氦池本身传导漏热及辐射漏热
1.5bara@4.5K, 流量10g/s

1. 研制背景和相关要求
2. 超导磁铁冷却方案
3. 低温恒温器的机械结构设计
4. 强度校核计算和温度场数值模拟
5. 总结和下一步计划

强度校核计算:

- 采用理论计算和仿真计算相结合的方式
- 真空室考虑承受外压1bara和内压1.2bara两种情况
- 氦池考虑承受内压2bara、3bara(小电流失超)、5bara (大电流失超)和外压1bara (抽真空置换)、2bara (真空破坏极端恶劣情况)
- 冷屏不承压, 只考虑自重下的变形

温度场数值模拟:

- 分析稳态时温度场温度均匀性, 确保冷质量能冷却到设计温度
- 根据仿真计算结果来确定结构优化方向
- 考虑非稳态降温/复温过程, 确定合理的降/复温速率
- 总热负荷计算值用于确定低温流体的管径和流量值

1、内筒体壁厚计算 (理论计算)

$$\delta = P \times D / (2.0 \times [\sigma] \times \varphi - P) + C_0$$

2、外筒体壁厚计算 (理论计算)

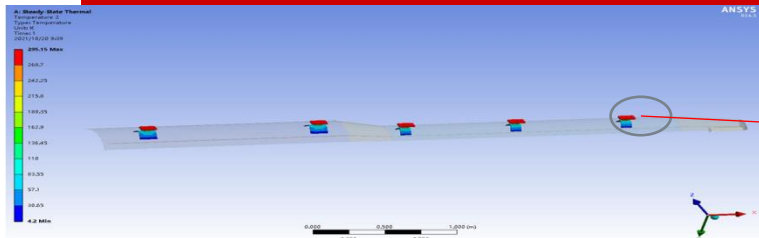
$$\delta = D_i^{0.6} \times (m \cdot P \cdot L / 2.59 \cdot E)^{0.4} + C_0$$

$$\text{固体导热: } Q_1 = A_1 \frac{\int_{T_1}^{T_2} \lambda_1(T) dT}{L_1}$$

$$\text{残余气体导热: } Q_2 = C_2 \alpha_0 P A (T_2 - T_1)$$

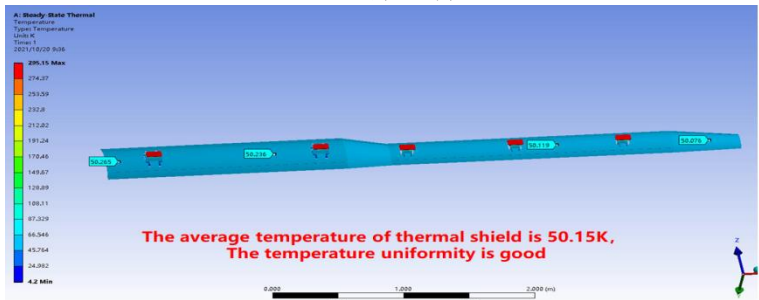
$$\text{辐射热: } Q_3 = \frac{A_3 \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

强度校核计算和温度场数值模拟



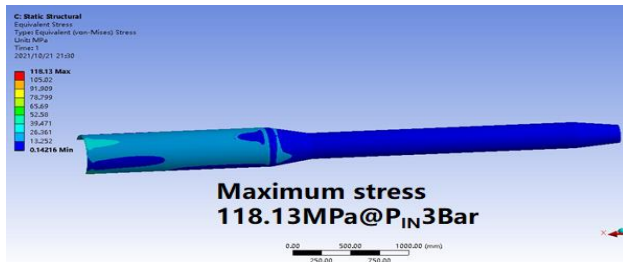
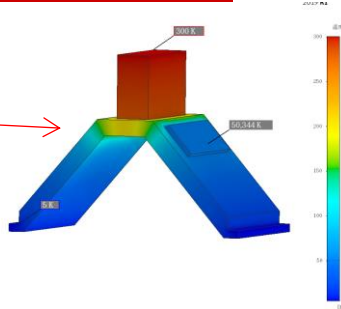
Heat load of thermal shield: $7.12 \times 4 = 28.48 \text{W}@50\text{K}$
Heat load for 4.2K temperature zone: $2.01 \times 4 = 8.04 \text{W}@4.2\text{K}$

冷质量支撑组件---温度场



The average temperature of thermal shield is 50.15K,
The temperature uniformity is good

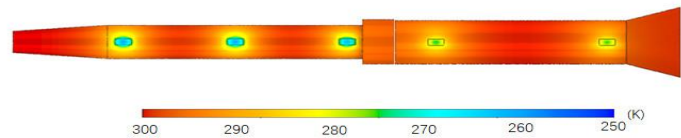
冷屏组件---温度场



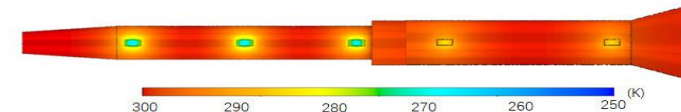
Maximum stress
118.13MPa@P_{IN}3Bar

氦池组件---应力分析

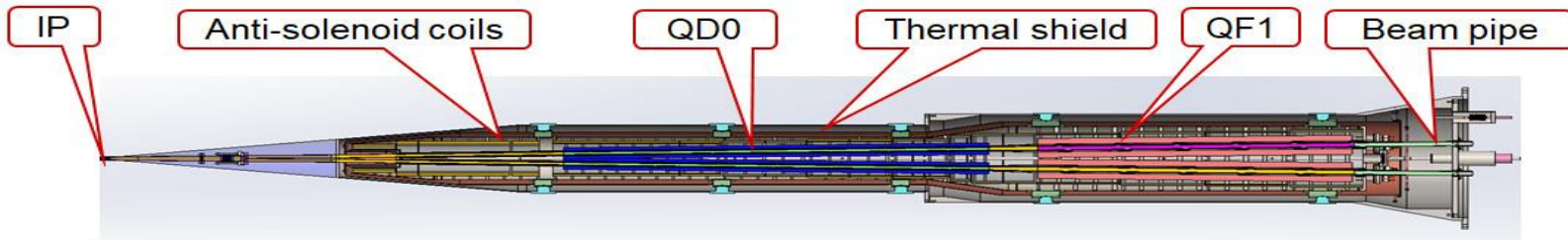
5 [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]



8 [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

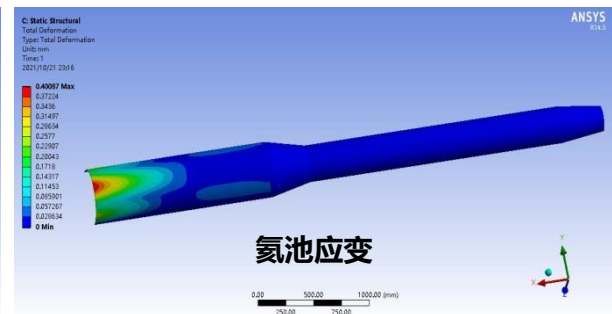
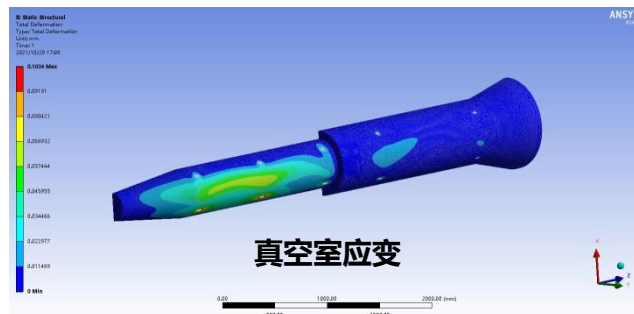
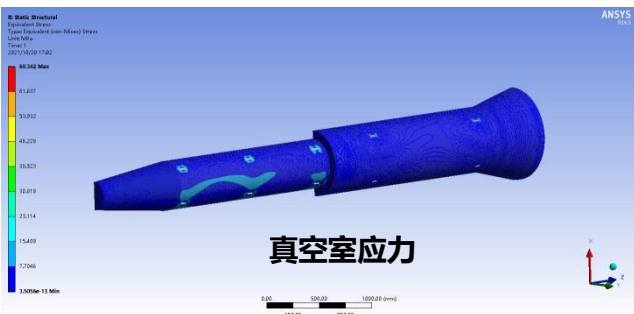
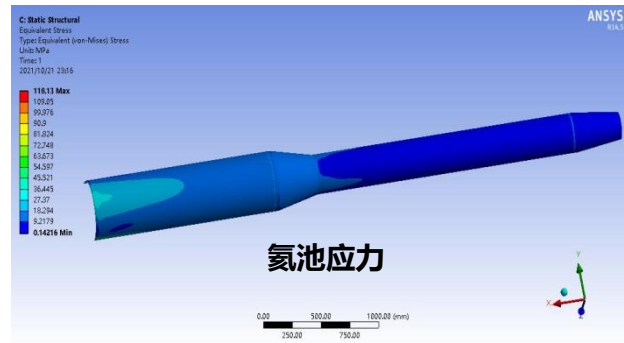


真空室组件---温度场分析



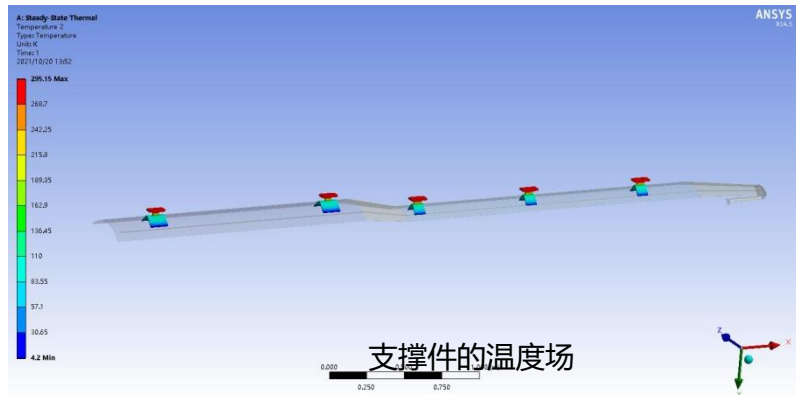
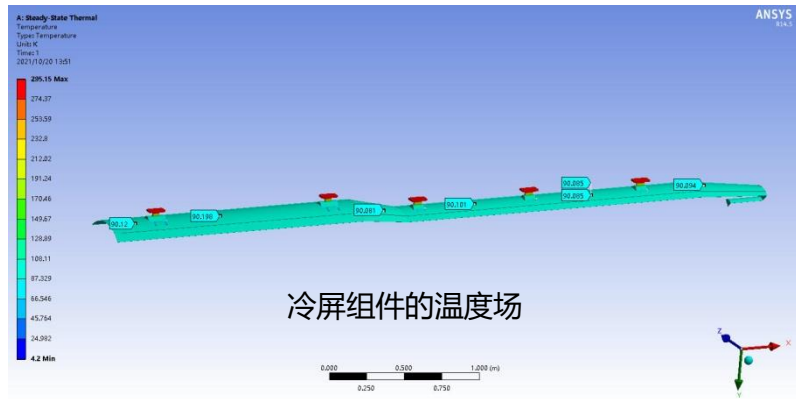
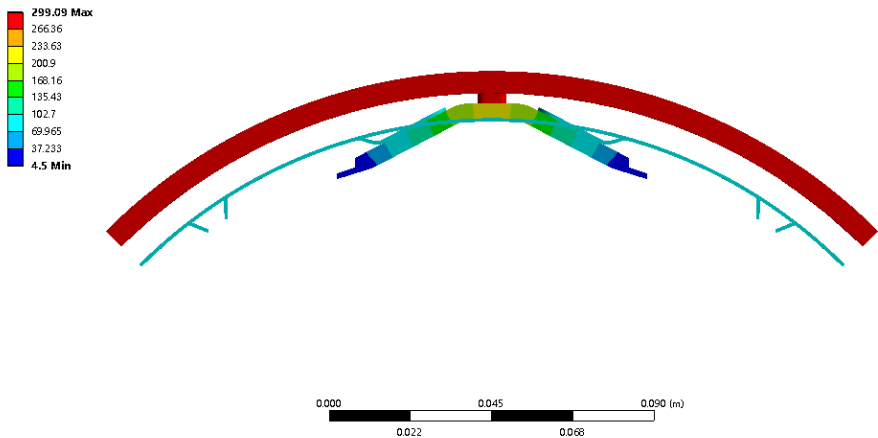
材料316L，弹性模量 $1.93E11\text{Pa}$ ，泊松比0.27，材料允用应力强度为 120.3MPa ；
材料304，弹性模量 $2.1E11\text{Pa}$ ，泊松比0.3，304不锈钢许用应力 $[\sigma] = 143\text{Mpa}$

部件	承压条件 (bara)	最大应力 (MPa)	最大变形量 (mm)	允用应力 (MPa)
氦池组件	内压5	118.13	0.40087	120.3
真空室组件	外压1	69.34	0.1034	143
	内压1.2	125.73	0.15281	143



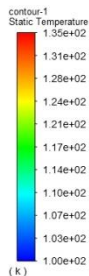
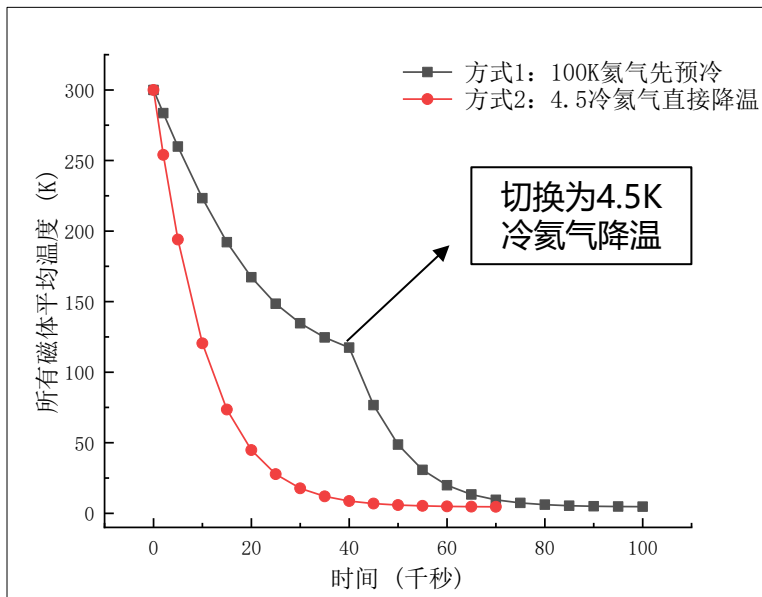
- 冷屏采用液氮进行冷却，设置冷屏盘管的温度为90K；
- 冷屏的平均温度90.1K，温度均匀性比较好
- 冷屏的热负荷： $4.39 \times 4 = 17.56\text{W}@90\text{K}$ ；
- 冷屏对4.2K的热负荷： $4.2 \times 4 = 16.8\text{W}@4.2\text{K}$

A: Steady-State Thermal
Temperature
Type: Temperature
Unit: K
Time: 1
2023/03/15 20:48

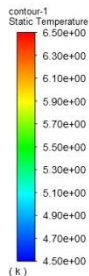


冷却过程

方式1	100K氦气预冷+4.5K液氦冷却	流量10g/s	磁铁温差小 (36K)	冷却时间长
方式2	4.5K液氦直接冷却	流量10g/s	磁铁温差大 (62K)	冷却时间短



方式1-40千秒时温度分布 (约11小时)

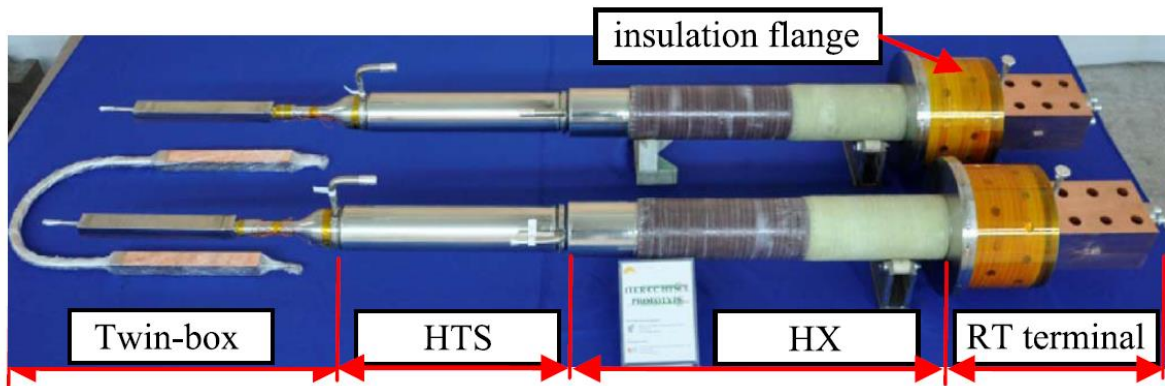


方式1-100千秒时温度分布 (约28小时)

二元气冷电流引线

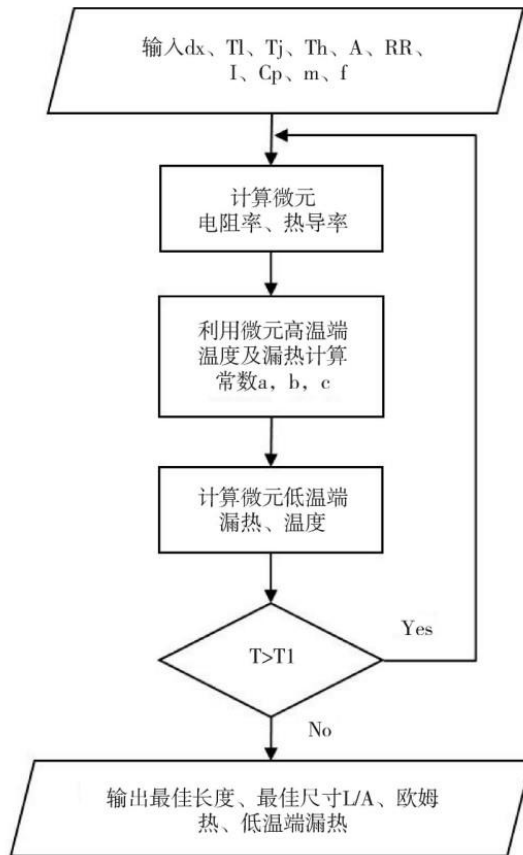
- 连接超导磁铁与室温电源，温度范围跨度大---4.5K到300K
- HTS材料采用Bi-2223/AgAu带材，分流器采用304不锈钢材料，利用多层超导带叠加的方式调整最大载流能力
- 设计目标：氦气冷却的自洽电流引线
- 超导线接头焊接工艺是难点---焦耳热

$$Q_{HTS} = \frac{A_{304}}{L} \int_{4.2}^{80} \lambda_{304}(T) dT + \frac{A_{HTS}}{L} \int_{4.2}^{80} \lambda_{HTS}(T) dT$$



2023-04-03

CEPC MDI Workshop, IHEP, Hengyang



自洽电流引线设计流程



● 总结

1. 完成了对撞区超导四极铁低温系统的初步设计，采用大流量迫流冷却方案----过冷氦循环系统
2. 完成了低温恒温器的结构初步设计，并进行了不同工况下的结构强度校核和温度场分析
3. 完成了电流引线的初步选型和相关计算

● 待完成设计内容

1. 真空室内筒体和束流管的挠度----长5.5m长，小空间内设计专用中部支撑，考虑后期安装问题
2. 升降流过程的涡流热的影响分析
3. 磁铁/氦池准直要求
4. 安全泄放设计



Thanks for your attentions !