

0.5m超导四级磁体 QD0短样机制造

万艺、邹伟

前言

高能环形正负电子对撞机（CEPC）对撞区布局中，加速器磁体深入到谱仪内部，为了极大地压缩对撞点处的束团尺寸以获得高的对撞亮度和消除谱仪磁场对加速器束流的影响，CEPC对撞点两侧各需要一台组合型超导磁体。该组合型超导磁体紧邻对撞点，其性能直接影响到整个对撞机能否达到设计指标。QD0超导四级磁体是最靠近对撞点的四极磁体，为带铁芯的 $\cos 2\theta$ 型双孔径超导四级磁体，它是国内首次自主研发 $\cos 2\theta$ 型超导四极磁体、QD0四级磁铁具有磁场梯度高、磁场精度高、磁体孔径小、长度大等特点，边界条件受到严格限制。很荣幸合肥科焯电物理设备制造有限公司能够参与QD0超导四级磁铁的研制工艺过程。

目录



CONTENTS



01

PART

公司简介

02

PART

QD0样机介绍

03

PART

QD0样机的研制进展

04

PART

QD0短样机下一步规划



COMPANY PROFILE

- ◆ **成立时间：**合肥科焯电物理设备制造有限公司成立于**2007年1月**；
- ◆ **经营范围：**电物理设备、超导磁体、低温工程、真空机械设备、加速器部件、磁铁/线圈、微波和高频设备、各类通用机械设备的设计、制造以及自动化控制产品研发。
- ◆ **61项国家专利和1项软件著作权。**
- ◆ **2011年、2014年、2017年、2020年，连续四届被认定为“高新技术企业”。**

公司现有人员包括管理人员、技术人员、质量人员、生产技工等300余人。

- ✓ 60人的研发团队，平均年龄32岁；
- ✓ 博士4人，硕士研究生8人，本科及以上学历98%；
- ✓ 研发团队包括：**机械工程师、材料工程师、机电工程师、电力工程师等。**

焊接

- ✓ 国际焊接技师；
- ✓ 国际焊工；
- ✓ 特种设备焊接；
- ✓ **TIG焊、MIG焊、电弧焊、真空钎焊、银铜钎焊、感应钎焊、电子束焊、激光焊等焊接技术。**

技术人员

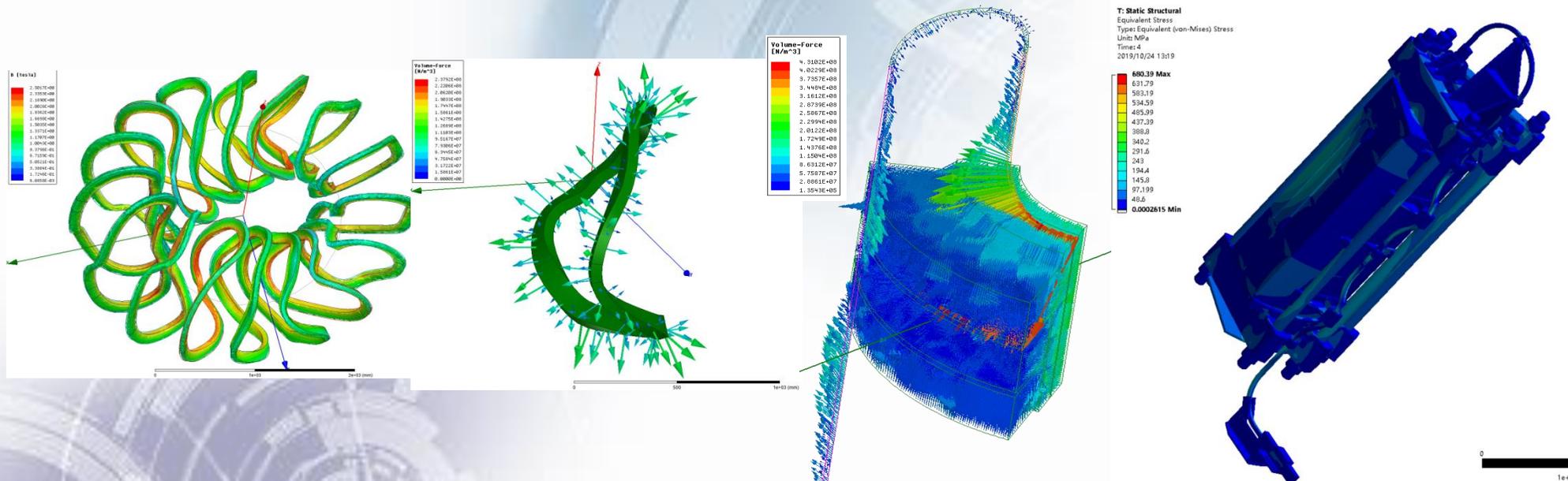
车间技工

检测人员

- ✓ 车、铣、刨、钳、数控加工中心、五轴加工、装配工等近200人

- ✓ **特种设备无损检测：焊缝的超声探伤、射线探伤，着色渗透探伤等无损探伤；**
- ✓ 真空检漏
- ✓ 三坐标/激光跟踪仪尺寸检测

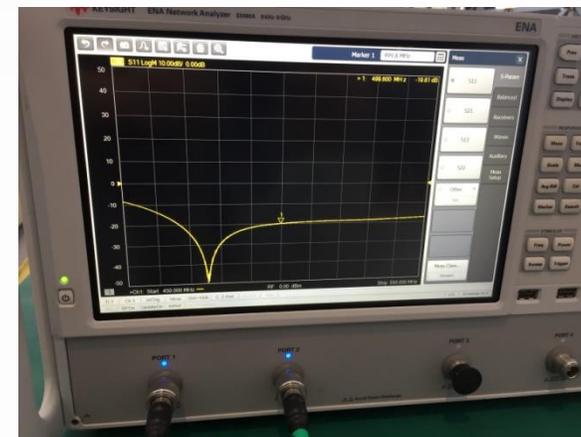
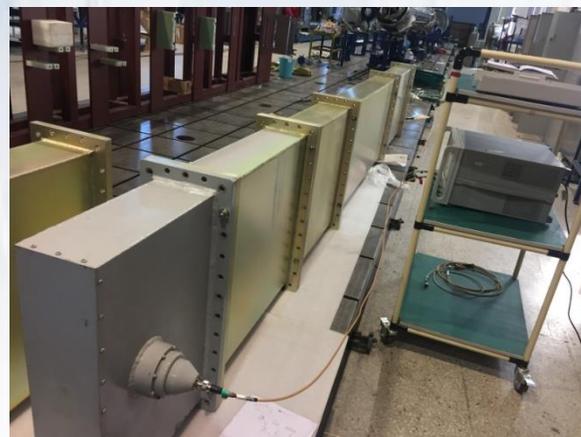
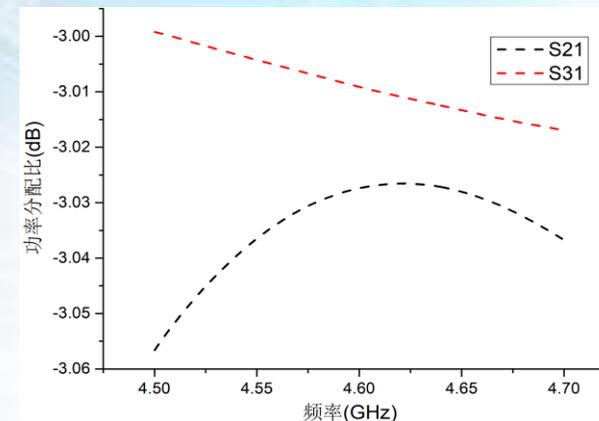
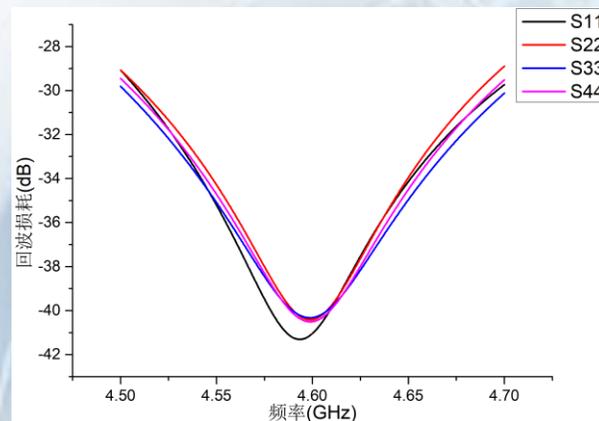
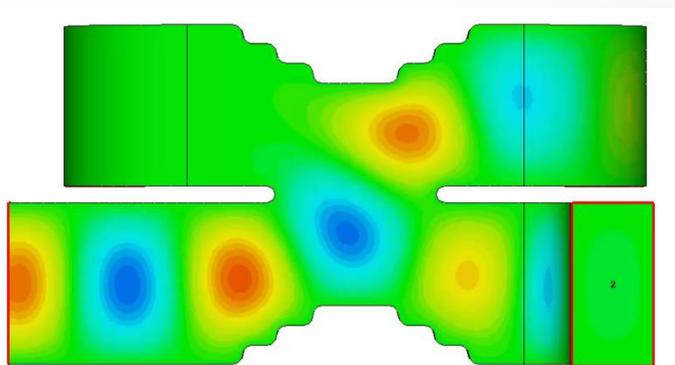
我公司具有多名**机械工程师**，**材料工程师**、**焊接工程师**、**机电工程师**等专业人员从事机械、电气、控制系统设计开发人员，并且多人具有10多年的非标部件设计开发工作经验。具有**机械设计**、**磁体设计**、**电气设计**、**电源设计**、**微波高频器件设计**；**机械结构有限元分析**，**电磁计算分析仿真**，**电磁**、**结构**、**热应力耦合分析**等以及**结构优化设计分析**的能力。



电磁分析仿真

电磁、热、结构耦合分析

高频器件仿真计算及器件低功率测试能力



1.3 硬件设施

我公司现有各类通用制造（车，铣，刨，磨，钳）设备、高精制造、焊接、钎焊、尺寸检测、无损检测、检漏设备375台/套，其中大型及精密设备88台。

- **先进切割设备**：大型数控等离子切割机、德国HWE-P4020水刀切割设备、线切割设备、激光切割设备；
- **精密加工中心**：数控立式加工中心、数控卧式加工中心、**卧式数控镗铣床、慢走丝数控线切割**、数控车铣加工中心；
- **大型加工中心**：落地镗铣加工中心、数控龙门镗铣床、6.3米数控立车；
- **多轴精密加工设备**：意大利JOBS五轴五联动龙门移动铣床、**六轴六联动卧式数控车铣中心**；
- **焊接设备**：氩弧焊设备、气保焊设备、自动焊设备；大型真空钎焊炉、氢气保护钎焊设备、感应钎焊；
- **环氧树脂真空浇注设备**：静态混料真空压力(VPI)浇注设备；
- **钣金设备**：数控四辊卷板机、数控弯管机；折边机；500T压机，100T压机；
- **热处理设备**：RT2-700-9电阻式热处理炉；真空热处理炉；
- **高精度尺寸检测设备**：激光跟踪测量仪、三坐标测量仪；
- **检漏及无损检测设备**：氦质谱检漏仪、超声波探伤仪、相控阵成像超声波探伤仪、X射线探伤检测设备。

1.4 典型案例

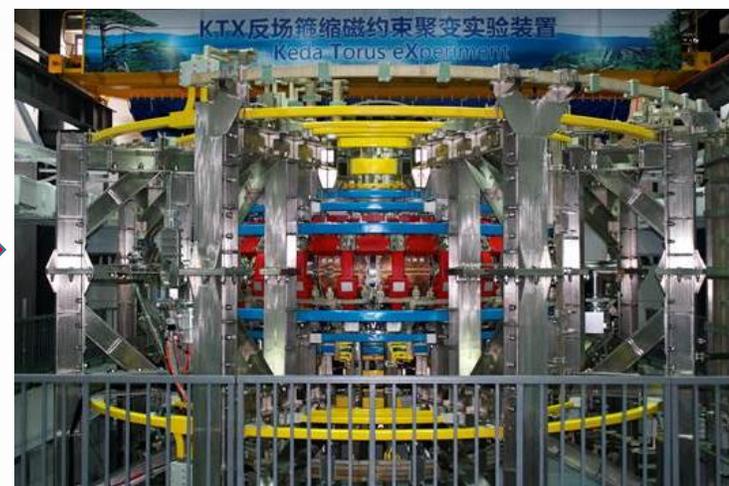
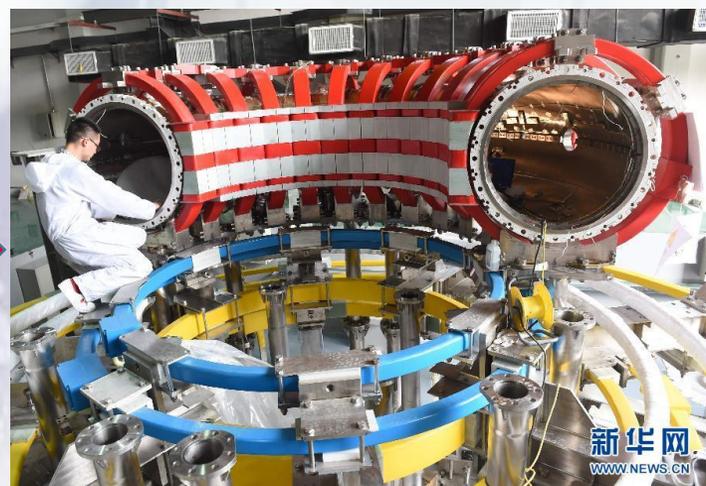
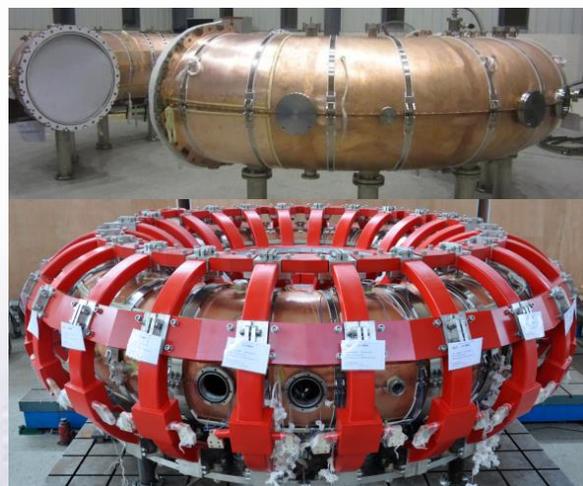
典型案例一：反场箍缩磁约束聚变实验装置（KTX科大一环）建造



科大一环是环形磁约束等离子体装置，是**先进磁约束聚变位形探索研究**的重要装置。大半径1.4m，小半径0.4m，中心场强0.7 T，最大等离子体电流1MA，电子温度约600eV，放电时间30~100ms。

2015年11月3日，我国首台反场箍缩磁约束聚变装置——“科大一环”每两分钟即可获得一次放电，**最大等离子体电流可达180千安，达到设计值的1.8倍。**

我公司承担了装置主机的加工制造和整体集成。



1.4 典型案例

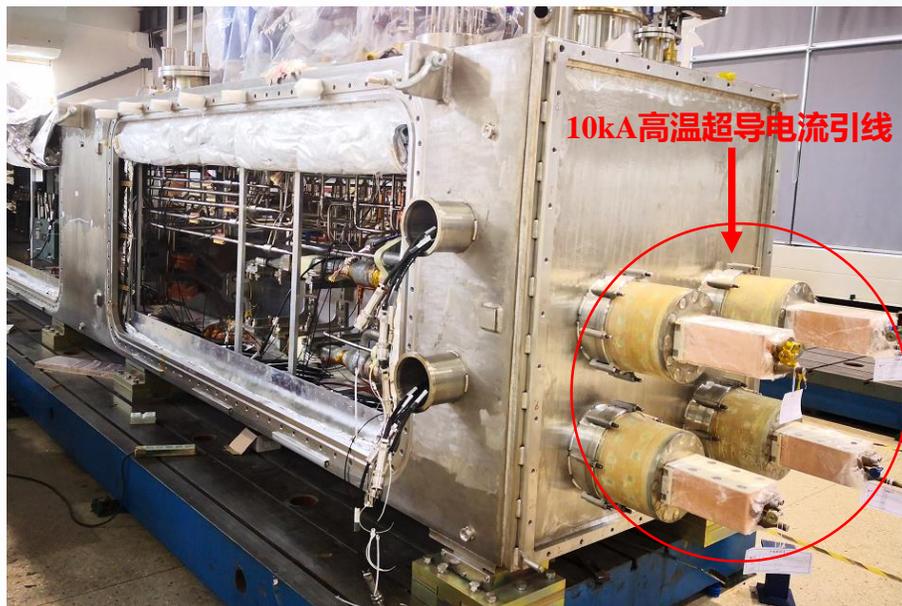
典型案例2：等离子体模拟装置建造



磁重联装置

1.4 典型案例

典型案例3：ITER磁体馈线系统部件研制



◆ CC-CTB终端盒



◆ ITER 10kA高温超导电流引线



◆ 过渡馈线



◆ 6kA/12kA/21k系列高温超导电流引线



◆ CC内馈线

测试结果：

- ◆ 65K端接头电阻约为 $10\text{n}\Omega$ ，优于设计要求的 $25\text{n}\Omega$ ；
- ◆ 5K端接头电阻小于 $1\text{n}\Omega$ ，优于设计要求的 $2.5\text{n}\Omega$ 。

1.4 典型案例

典型案例4：超导磁体/线圈相关设备



◆ 2T超导磁体

- 磁场2T
- 室温孔径80mm



◆ 超临界氦外冷却90度
超导二极磁体



◆ 微波管超导磁体

- $B_0 = 5.8 \text{ T}$
- 室温孔径：上端 $\Phi 190 \text{ mm}$ ，下端 $\Phi 280 \text{ mm}$
- 阴极补偿线圈(Gun Coil)调节范围：1000 Gs
- 磁场位形绝对值偏差： $< 20 \text{ Gs}-10\text{Gs}$

1.4 典型案例

典型案例5：超导磁体/线圈相关设备

□ CFETR 中心螺线管超导模型线圈绕制生产设备

➤ CS模型线圈的研制，是我国首次研制成功的大尺寸超导中心螺线管线圈，为后续CFETR的建造提供了宝贵的经验。



◆CSMC NbTi线圈

- 外形尺寸： $\Phi 2457.4 * \Phi 547.4 * 545\text{mm}$
- 最终线圈绕制精度： $\pm 2\text{mm}$



◆CSMC Nb₃Sn线圈

- 外形尺寸： $\Phi 1951 * \Phi 2359 * 1648.6$
- 最终线圈绕制精度： $\pm 2\text{mm}$



1.4 典型案例

典型案例6：加速器磁铁研制



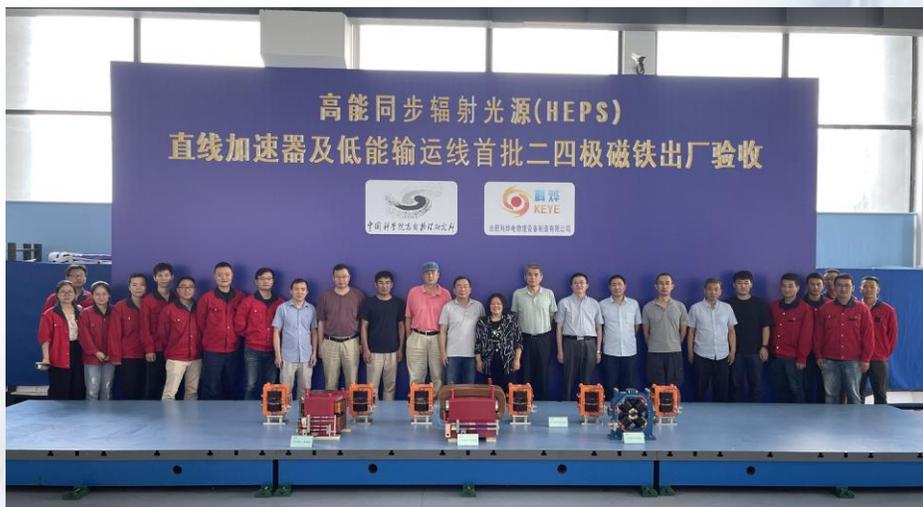
高能同步辐射光源校正磁铁



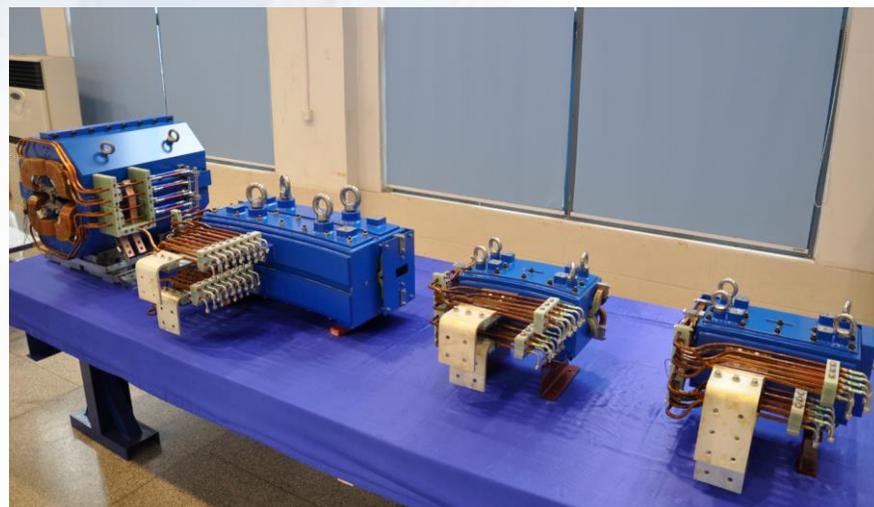
□ HEPS直线加速器和运输线的二极、四极和校正磁铁主要用于束流的偏转和能量分析、束流的聚焦以及轨道校正；

□ 由于HEPS属于第四代光源，对加速器磁铁性能要求很严格，因此对磁铁材料的性能指标、零部件的加工精度都提出了很高的要求。

□ 我公司为上海光源、北方光源提供了静磁切割磁铁、校正磁铁、快校正磁铁及超导磁铁研制。



高能同步辐射光源二四极磁铁



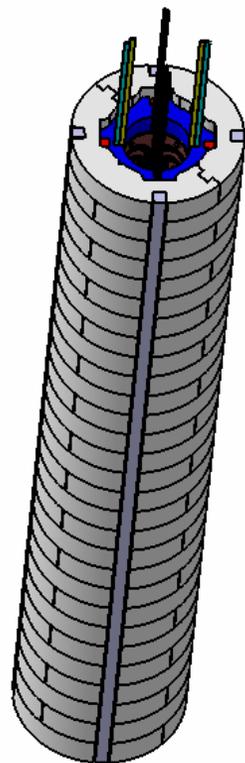
质子治疗装置注入引出切割磁铁

二、QD0样机介绍

超导四级磁体QD0短样机介绍

QD0-超导四级磁体是最靠近对撞点的四极磁体，为带铁芯的 $\cos^2\theta$ 型双孔径超导磁体，两孔径中心线不是平行的，夹角为33mrad。

QD0-超导四级磁铁目前研制的是0.5m的单孔径短样机；

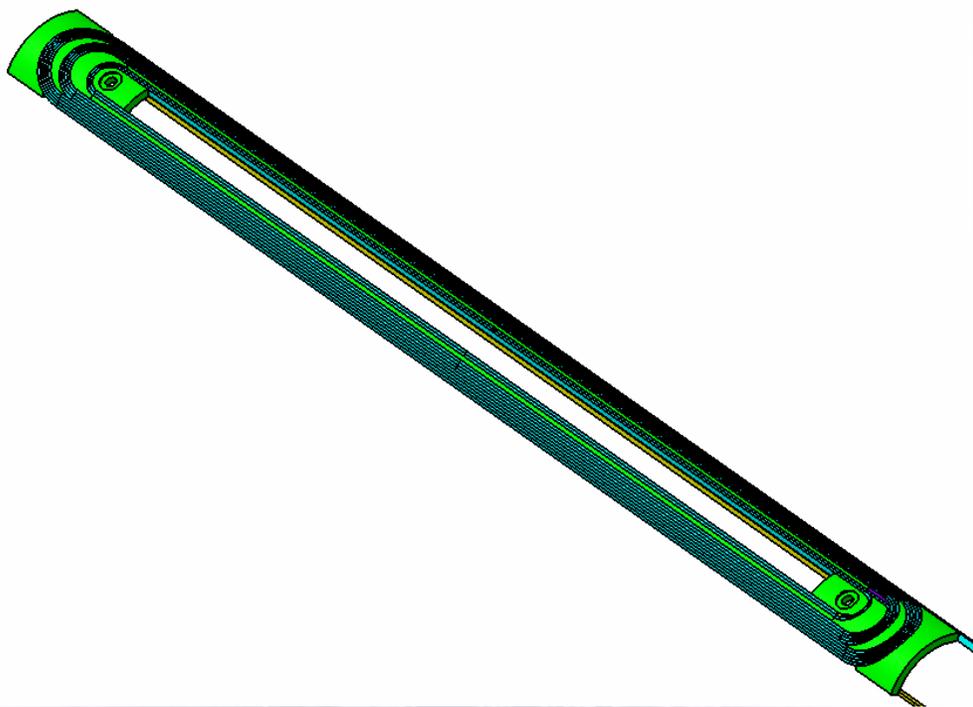


Magnet name	QD0 model magnet
Field gradient (T/m) (In two apertures)	136
Magnetic length (m)	0.5
Coil turns per pole	21
Excitation current (A) (In two apertures)	2080
Coil layers	2
Conductor	Rutherford Cable, width 3 mm, mid thickness 0.93 mm, keystone angle 1.9 deg, Cu:Sc=1.3, 12 strands
Stored energy (KJ) (Double aperture)	5.0
Inductance (H)	0.0023
Peak field in coil (T)	3.4
Coil inner diameter (mm)	40
Coil outer diameter (mm)	53.2
X direction Lorentz force/octant (kN)	24.6
Y direction Lorentz force/octant (kN)	-23.7

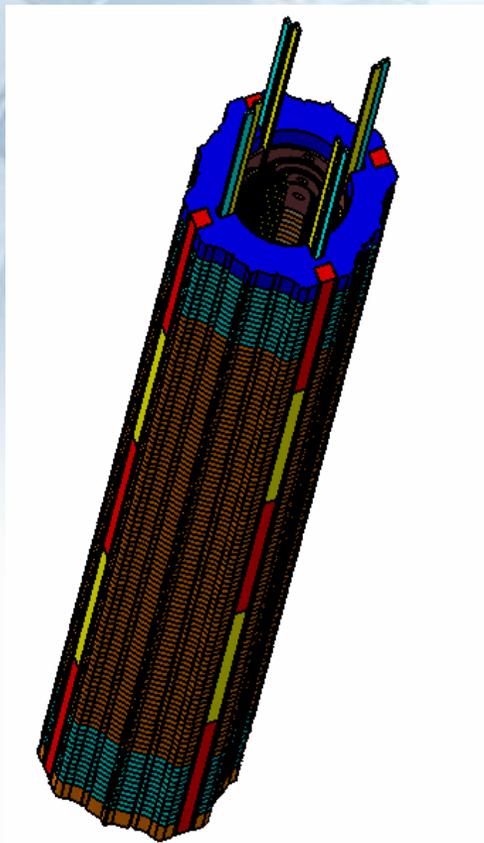
二、QD0样机介绍

超导四级磁体QD0短样机介绍

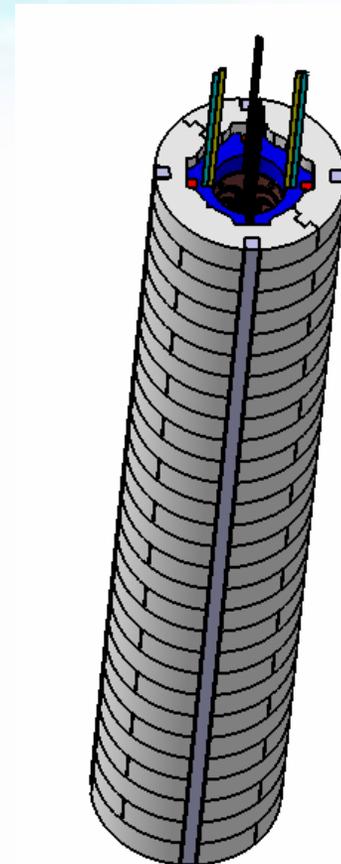
目前研制的0.5m的单孔径短样机由四组超导四级线圈组成，再通过液压同步设备将四组超导四级线圈与不锈钢卡箍、铁芯组合在一起，形成单孔径超导四级磁体。



4组QD0-超导线圈



卡箍装配



铁芯装配

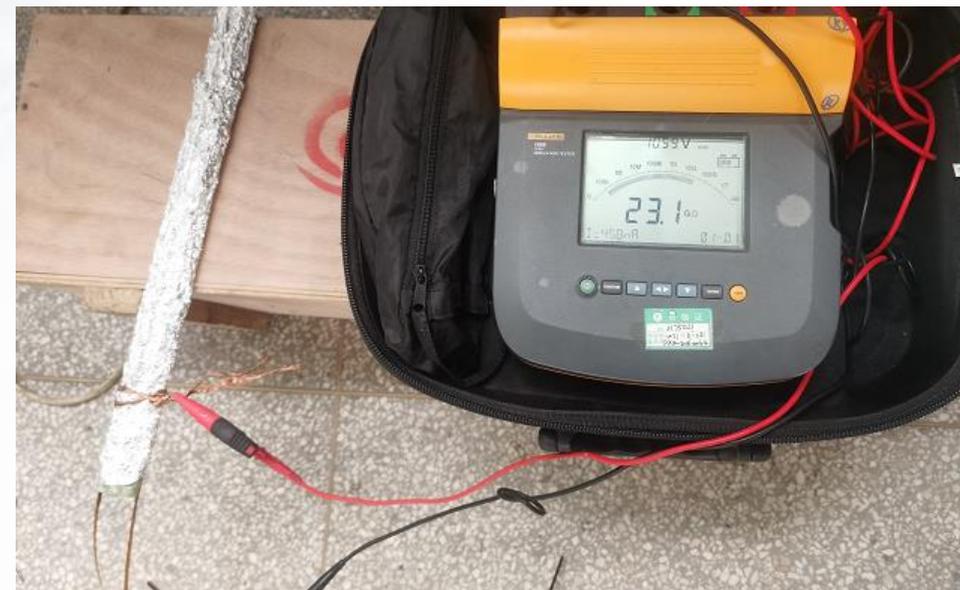
三、QD0样机研制进展

3.1 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈的进展



QD0-超导线圈的目前研制的进展是已经完成了绕制及固化成型的过程，通过了1000V的对地绝缘测试；

QD0-超导线圈是短样机研制过程的核心工艺步骤，线圈绕制和固化均有其特点，我公司通过使用铜缆摸索其工艺特点，不断改进绕制和固化的工艺，完成了四级线圈的工艺过程；



三、QD0样机研制进展

3.1 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈的绕制的难点

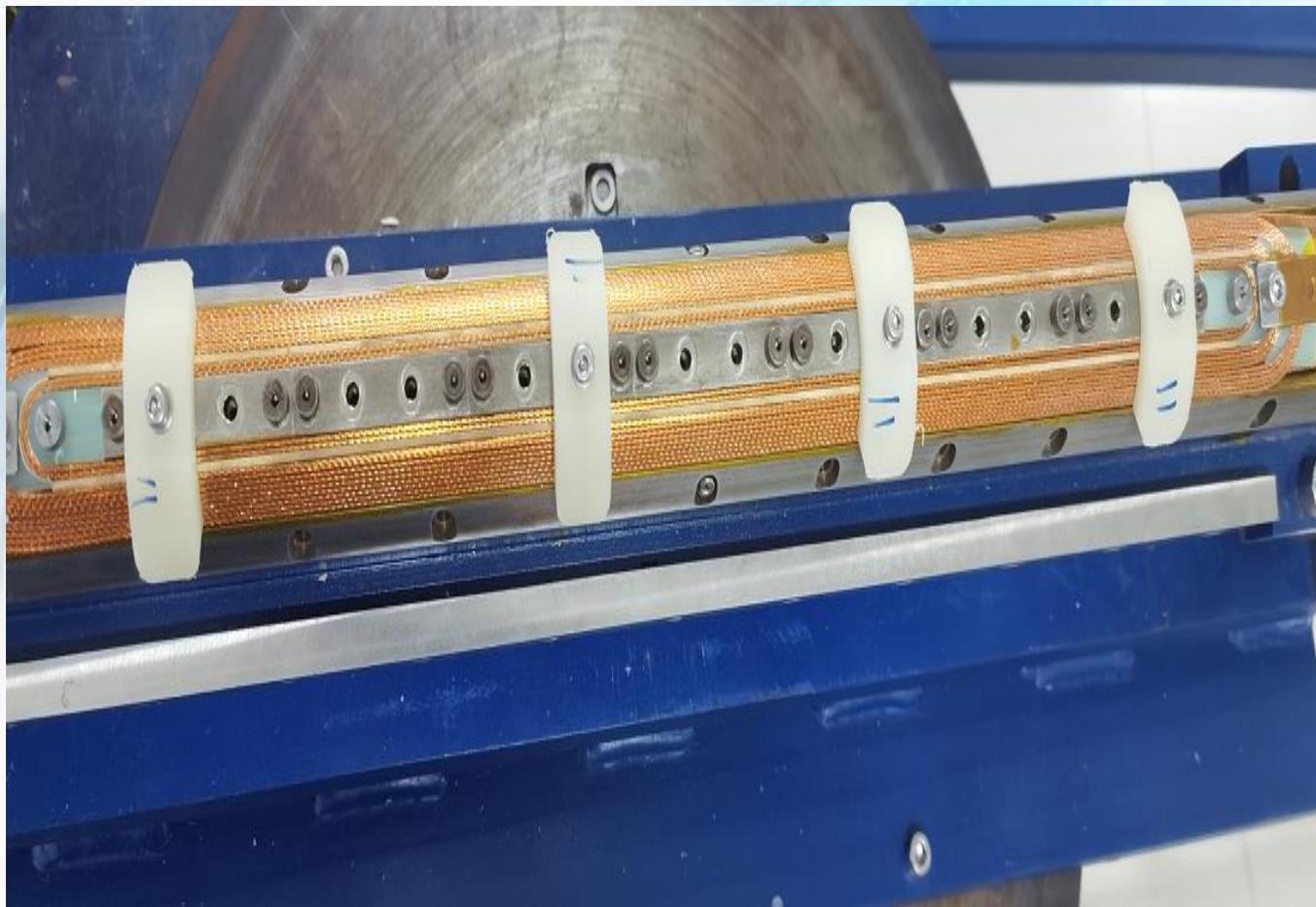


QD0超导四级线圈有以下几个特点导致的绕制的难点：

- 1、线圈是由梯形畸变角截面的卢瑟福超导电缆组成，其结构特点导致线圈在弧形端部及直段侧面形成很多加工负角；**
- 2、线圈的结构是双层结构，上下总厚度仅有6.7mm宽度，线缆宽度3mm，在双层爬匝的部位的二层的线圈与底层线圈交汇时，容易导致二层线圈的跑线；**
- 3、线圈截面成弧形，因拉应力存在，线圈在沿弧面成型时会跑线，因线圈需要添加填补块，也不能一直压紧不放。**

三、QD0样机研制进展

3.1 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈的绕制的难点



我公司通过五轴加工中心，加工带有负角的填补块，通过不同的压紧工装去解决爬匝及跑线等在绕制过程的问题，成功将线圈绕制完成

三、QD0样机研制进展

3.2 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈的固化的难点



QD0超导四级线圈固化的特点及难点：

- 1、QD0超导四级线圈在固化时，不紧要将线圈压紧达到成型尺寸，还需要施加一定的压力，保证线圈存在内应力；**
- 2、QD0超导四级线圈在固化时，需要保持在200摄氏度的高温下，压力机保压过程中绝缘固化能保证不被破坏；**

我司通过一些绝缘保护的改进措施，使产品在施压过程中线圈形变时不会使绝缘被破坏。



三、QD0样机研制进展

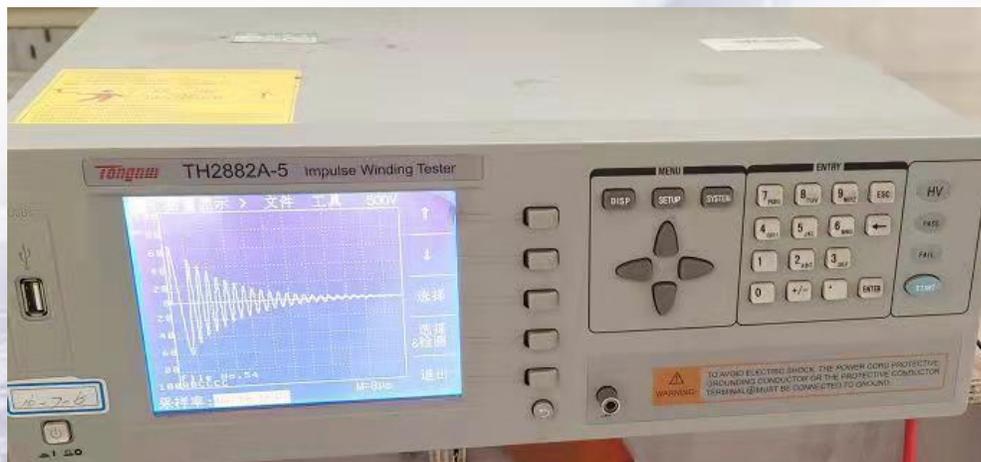
3.3 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈的绝缘测试



QD0超导四级线圈在绕制和固化完成后需要进行绝缘测试：

匝间短路，施压脉冲电压500V，查看波形，

对地绝缘检测：施加直流电压1000V，1分钟，检测有否放电击穿现象



三、QD0样机研制进展

3.4 0.5m超导四级磁体QD0-短样机-线圈与卡箍的装配



QD0-超导线圈卡箍的装配是短样机研制过程的核心工艺步骤，装配时需要确保线圈卡箍成型时被施加了许用应力，我公司目前正在摸索这个过程；



四、QD0短样机下一步规划

QD0-超导四级磁铁短样机在朱应顺老师团队的带领和指导下，
目前稳步推进，已完成全工艺探索的步骤；

下一步研制规划：

预计在年前完成完成新的线圈绕制及设备提升整改；

预计在2022.4月完成短样机制造；

预计在2022.10月完成双孔径样机制造；

