



·粒子束及加速器技术·

## 中国散裂中子源二期双 spoke 超导腔设计\*

周文中<sup>1,2,3</sup>, 潘卫民<sup>1,3</sup>, 葛锐<sup>1,3</sup>, 贺斐思<sup>1</sup>, 李中泉<sup>1</sup>, 王子晗<sup>1,3</sup>, 米正辉<sup>1</sup>,  
黄彤明<sup>1</sup>, 戴劲<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>, 徐妙富<sup>1</sup>, 李梅<sup>1</sup>, 王小龙<sup>1,2</sup>,  
刘佰奇<sup>1</sup>, 张新颖<sup>1</sup>, 刘华昌<sup>1,2</sup>, 彭军<sup>1,2</sup>, 王生<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 中国散裂中子源是中国第一台、世界第四台脉冲型散裂中子源, 其已于 2020 年 2 月达到 100 kW 功率的设计指标, 运行稳定高效, 供束效率位于国际前列。中国散裂中子源二期升级方案中总束流功率将升级到 500 kW, 其中直线加速器段将采用超导加速腔结构, 束流能量由 80 MeV 提高到 300 MeV。其中在 80~165 MeV 能量段采用 324 MHz 双 spoke 超导腔, 在 165~300 MeV 能量段采用 648 MHz 6-cell 椭球超导腔。采用 CST、COMSOL 等仿真软件完成 324 MHz 双 spoke 超导腔的电磁、机械设计及优化, 达到实际运行指标要求。为了提高腔运行的稳定性, 在腔的设计中对  $E_p/E_{acc}$  着重进行了优化, 使其尽量降低。

**关键词:** 双 spoke 超导腔; 氦压灵敏度; 洛伦兹力失谐; 二次电子倍增; 调谐灵敏度

中图分类号: TL503.2

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220266

## Design of the China Spallation Neutron Source phase II double spoke resonator

Zhou Wenzhong<sup>1,2,3</sup>, Pan Weimin<sup>1,3</sup>, Ge Rui<sup>1,3</sup>, He Feisi<sup>1</sup>, Li Zhongquan<sup>1</sup>, Wang Zihan<sup>1,3</sup>, Mi Zhenghui<sup>1</sup>,  
Huang Tongming<sup>1</sup>, Dai jin<sup>1</sup>, Ma qiang<sup>1</sup>, Xu Miaofu<sup>1</sup>, Li Mei<sup>1</sup>, Wang Xiaolong<sup>1,2</sup>,  
Liu Baiqi<sup>1</sup>, Zhang Xinying<sup>1</sup>, Liu Huachang<sup>1,2</sup>, Peng Jun<sup>1,2</sup>, Wang Sheng<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The China Spallation Neutron Source (CSNS), located in Dongguan city, is the country's first and only spallation neutron source. It is also the fourth spallation neutron source in the world. It achieved the design index of 100 kW power in February 2020, and its operation is reliable and efficient. The total beam power will be increased to 500 kW in the CSNS phase II upgrade design, where the linac beam energy will be boosted from 80 MeV to 300 MeV and the peak current intensity will be increased from 15 mA to 50 mA by incorporating a superconducting linear accelerator. The double spoke resonator (DSR) will be used in the energy range of 80 MeV to 165 MeV. In the energy range of 165 MeV to 300 MeV, 6-cell ellipsoidal cavity will be used. DSR has many advantages, such as large velocity acceptance, which allows the spoke cavity to be used for a wider range of velocities, small size, high shunt impedance and a high coupling degree, which allows the production error requirements to be relaxed and the frequency bandwidth to be broadened from neighboring modes, among others. The DSR performance, including electromagnetic properties and machine parameters, was simulated and optimized using CST, COMSOL and other simulation software, and it achieved the requirement of CSNS phase II upgrade project. To improve the operating stability of the cavity, the design focused on minimizing  $E_p/E_{acc}$ .

**Key words:** double spoke resonator, pressure sensitivity, Lorentz force detuning, multipacting, tuning sensitivity

\* 收稿日期: 2022-08-26; 修订日期: 2023-01-01

联系方式: 周文中, zhouwz@ihep.ac.cn。

通信作者: 潘卫民, panwm@ihep.ac.cn。

中国散裂中子源(CSNS)一期已于2020年2月达到100 kW的功率设计指标,二期升级工程列入国家十四五重大科技基础设施建设规划。在二期升级方案中,主要是在目前运行的常温直线加速器之后增加一段超导加速器,将直线束流能量由80 MeV提升至300 MeV,峰值流强由15 mA提升到50 mA,快循环同步加速器(RCS)质子束功率由100 kW升到500 kW,平均流强由62.5  $\mu$ A升到315  $\mu$ A。在升级方案中直线加速器采用 $\beta_0$ 为0.5的双spoke超导腔(DSR)和 $\beta_g$ 为0.62的6-cell椭球超导腔。其中每两只双spoke腔放在一个恒温器中,共10组双spoke腔恒温器;每三只6-cell椭球腔放在一个恒温器中,共8组椭球腔恒温器。该设计方案能将束流能量在有限的空间范围内由80 MeV提高到300 MeV。

## 1 双spoke超导腔电磁设计

在中低 $\beta$ 超导腔中spoke腔占有很大优势,该腔型具有以下几个优点<sup>[1-5]</sup>:较大的分路阻抗、较大的速度接受度;加速间隙通过磁耦合连接拥有较强的耦合度,具有较好的平坦度并降低了制造误差要求;相近模式的频率隔离度较大,易于高次模引出;较工作于相同频率的TM腔型,具有较小的尺寸。

影响超导腔性能最重要的因素是场致发射和腔体热失超,而表面电磁场峰值是引起场致发射和腔体热失超的决定因素。因此为了使超导腔获得更大加速梯度 $E_{acc}$ 和 $Q$ 值,应尽量降低 $E_p/E_{acc}$ 和 $B_p/E_{acc}$ ;为减少腔的损耗,应尽量提升 $GR/Q$ 的值。其中 $E_p$ 为峰值电场值; $B_p$ 为峰值磁场值; $G$ 是腔几何因子; $R/Q$ 是腔的特性阻抗,它是不依赖于腔体比例尺度和腔体材料性质的结构参数。

根据国内外超导腔的研制、测试情况及中科院先导专项ADS项目中spoke腔的运行数据,spoke腔在35 MV/m峰值电场情况下可能会发生场致发射,而峰值磁场 $B_p$ 小于90 mT时极少发生失超。因此在设计时,尽量在降低 $E_p/E_{acc}$ 的同时保持 $B_p/E_p < 2.57$  mT/(MV/m)。

由于CSNS二期隧道预留空间有限,且加速器工作在占空比较小的脉冲状态,整腔正常工作情况下平均热损耗比较小,对 $B_p/E_{acc}$ 、 $GR/Q$ 要求相对没有那么严苛,重点是降低 $E_p/E_{acc}$ 。另外,此项预研要为CSNS二期超导腔的批量化生产做好工艺优化,因此在成型样腔<sup>[6]</sup>的基础上,进行电磁及机械设计优化时要全局统筹考虑。

### 1.1 基本电磁参数

本设计采用CST微波工作室仿真软件进行三维建模及电磁参数优化。双spoke腔的基本模型及主要参数见图1所示。

Spoke腔本质上是同轴谐振器演化而来,工作于半波长类TEM模式,因此与同轴谐振器具有相近的电磁场分布。文献[7]对spoke基部和spoke束流孔区域采用不同形状的几何结构进行组合(圆锥形和跑道形)比较,当两个区域均采用横向跑道形几何结构时,其 $E_p/E_{acc}$ 和 $B_p/E_{acc}$ 均能达到最佳。本文的设计方案基于跑道形几何结构进行优化。

双spoke腔直径约为 $\lambda/2$ ,其中半径 $R_{cav}$ 和腔长 $L_{cav}$ 对频率起决定作用,而腔的几何结构和 $L_{iris-iris}$ 对 $\beta_0$ 起主要作用。优化时首先要保证频率和 $\beta_0$ 达到设计要求,在这两个基本参数不变的情况下对其他参数分别进行优化。根据电磁仿真结果,电场主要集中在束流孔区域,磁场集中在spoke柱base区域。因此spoke束流孔区域基本参数 $H_a$ 、 $L_a$ 、 $W_a$ 决定了表面电场峰值 $E_p$ 的大小;Spoke基部的几何参数 $W_b$ 、 $L_b$ 决定了表面磁场峰值 $B_p$ 的大小。

在参数优化扫描过程中采用逐步参数扫描优化方法,首先,对束流孔区域基本参数进行扫描,只改变其中一个参数值,使 $E_p/E_{acc}$ 达到最优后固定下来,然后对另外的参数进行扫描;第二步,对spoke基部的参数分别进行扫描,使 $B_p/E_{acc}$ 达到最小后再对其它参数进行扫描;第三步,对端盖圆锥处的基本参数 $H_T$ 、 $R_{T\_in}$ 、 $R_{T\_out}$ 进行扫描,这样再经过反复地迭代,以获取最佳参数。优化流程见图2。

Spoke束流孔区域的几何结构决定了 $E_p/E_{acc}$ 的大小。当参数 $L_{a-a}$ 在一定范围内变化时, $E_p/E_{acc}$ 的变化比较敏感,而 $B_p/E_{acc}$ 则变化不大;Spoke柱束流孔跑道的 $R_a$ 对 $E_p/E_{acc}$ 变化比较敏感。通过CST仿真分析,其电场峰值出现在spoke柱束流孔跑道圆弧处,选择合适的几何尺寸可以使电场均匀分布在圆弧上,避免电场过度集中在一点上。如图3所示,当电场均匀分布在束流孔圆弧处时,其 $E_p/E_{acc}$ 较理想。

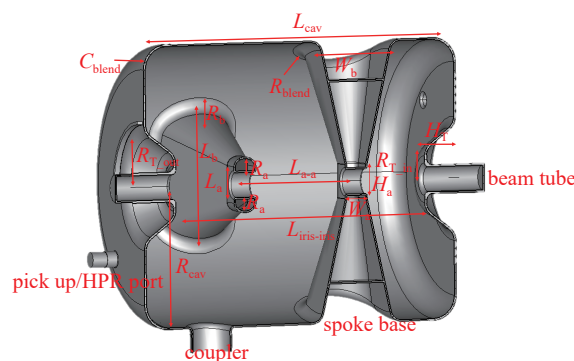


Fig. 1 Schematic diagram of basic parameters of double-spoke cavity

图1 双spoke腔的基本参数示意图

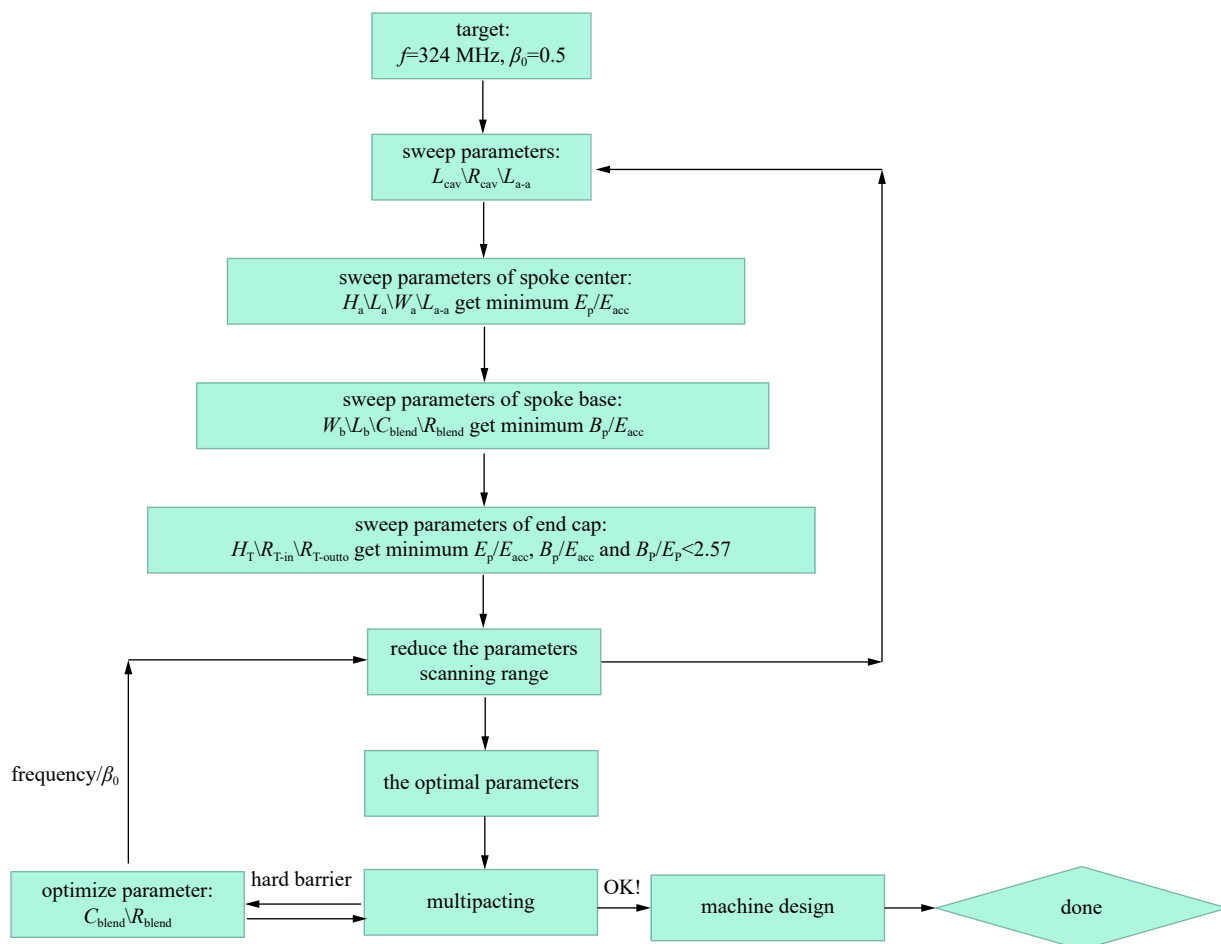


Fig. 2 Flow chart of parameter optimization

图 2 参数优化流程框图

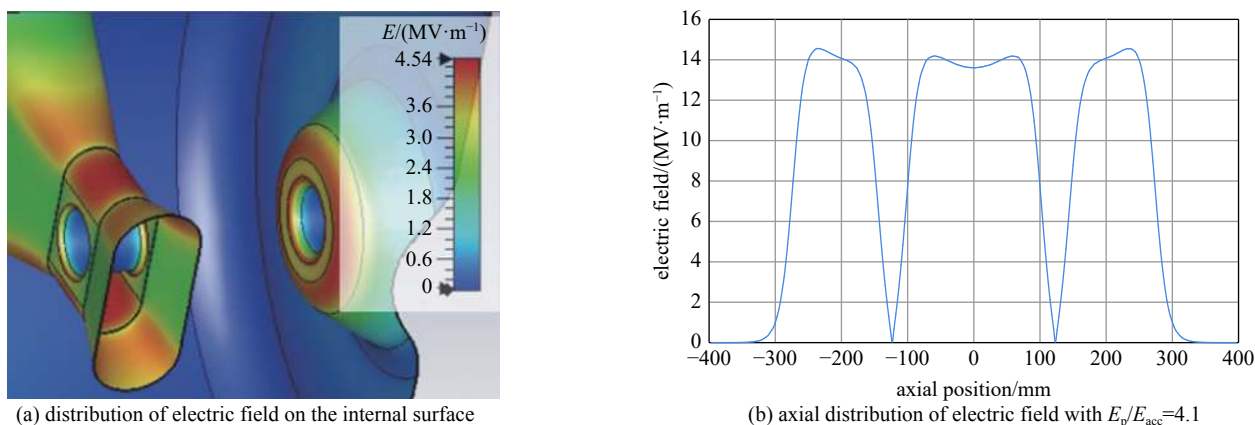


Fig. 3 Distribution of electric field on the internal surface and axis with  $E_p/E_{acc}=4.1$

图 3  $E_p/E_{acc}=4.1$  时电场在内表面及轴向分布

Spoke 基部的基本尺寸决定了磁场表面场峰值的大小, 优化参数的目的是使磁场在 spoke 柱基部均匀分布, 避免磁场过度集中。原理上当 spoke 基部越大, 越有利于磁场的均匀分布, 但考虑到后期的生产工艺需求及焊接难度, 需要将外导体分成两半来分别与 spoke 焊接, 因此 spoke 基部的  $W_b$  不能超过腔的中心线且要留有一定宽度, 确保腔焊接的完美性。

在优化过程中发现当参数  $W_b$ 、 $L_b$ 、 $R_b$  已确定的情况下, 当  $R_{blend}$  在一定范围内变化时, 其对表面磁场峰值影响较小, 但它对频率影响比较明显, 所以在优化过程中当频率有一定偏移时, 可以通过调整它的大小来调整频率而不会对  $E_p/E_{acc}$  和  $B_p/E_{acc}$  产生较大的影响。

在运行梯度为 7.3 MV/m 的情况下,  $E_p$  为 30 MV/m,  $B_p$  为 67 mT。主要电磁参数如表 1 所示。

表 1 双 spoke 腔主要电磁参数  
Table 1 Main electromagnetic parameters of DSR

frequency/MHz	$\beta_0$	aperture/mm	$E_p/E_{acc}$	$B_p/E_{acc}/(mT \cdot MV^{-1} \cdot m)$	$G/\Omega$	$(R/Q)/\Omega$	operating gradient/(MV·m <sup>-1</sup> )
324	0.5	50	4.1	9.2	120	410	7.3

Spoke 腔拥有较大的渡越时间因子(TTF)分布<sup>[8]</sup>,设计的双 spoke 腔的 TTF 曲线如图 4 所示,在整个双 spoke 超导腔工作区间,其 TTF 在 0.600~0.774 之间,在  $\beta_0$  为 0.5 时,最大 TTF 为 0.774。图中红色虚线为腔的工作能量区间对应的 TTF。双 spoke 腔的基模及高次模频率见表 2。

### 1.2 二次电子倍增效应<sup>[9]</sup>

二次电子倍增(multipacting, 简称 MP)是影响射频超导腔性能的一个重要因素,其原理是当一个电子从腔表面发射出来后,在电磁场的影响下会吸收射频场功率而撞击到微波面上,在一定的能量区间和发射角度内它可能会激发出更多的二次电子,二次电子会呈指数级增加。若二次电子过多,其会吸收大量的射频功率,导致腔压下降,甚至会引起超导腔局部过热,引发热崩溃。因此限制二次电子倍增效应是设计超导腔的一个重要内容。

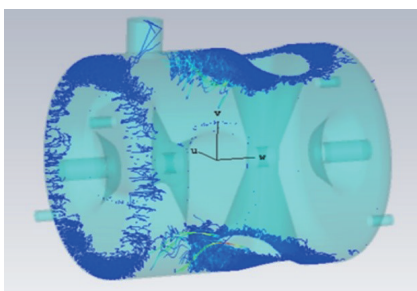
MP 分为软壁垒和硬壁垒。当超导腔遇到软壁垒时可以通过射频功率老炼逐步消除 MP,当软壁垒消除后,加速梯度会随功率的升高而上升。而当通过长时间的老炼,超导腔在一定的加速梯度下仍会发生强烈的 MP,则判断其是硬壁垒,需要通过一定的手段来处理。

二次电子倍增效应的强弱与腔的几何形状、材料的性质有直接的关系。本设计采用 CST Particle Studio TRK 求解器来进行计算与优化。它通过计算二次电子发射率(SEY)来检测是否会发生二次电子倍增。CST 材料采用 SEE (secondary electron emission)-Furman 模型,通过公式:  $Y_{SE}=I_s/I_0$ , 来计算 SEY 值,其中  $I_s$  和  $I_0$  分别是二次电子电流值和初始入射电子电流值。当  $Y_{SE}<1$  时说明不会发生 MP,当  $Y_{SE}>1$  时说明会发生 MP。这里选两种不同 SEE 的铌材来模拟老炼前后的铌材料。其中用 300 °C 烘烤铌材当作老炼前的铌材,用 Ar 电离清洗铌材当作射频老炼后的铌材。

在双 spoke 腔中极易发生 MP 的位置如图 5(a)所示,其均处于强磁场区,电子在端盖与外导体之间或 spoke 基部与外导体之间形成一阶两点 MP。从下图中可以看出,不同材料的 SEY 有较大幅度的变化,在加速梯度为 2 MV/m 和 4 MV/m 时,其值达到 1.2 左右,但是根据实际垂测经验<sup>[10]</sup>,当 SEY 在 1.2 下时,可以通过功率老炼来消除 MP。

### 1.3 耦合器 $Q_c$ 计算

根据加速腔带束运行要求,束流 50 mA, 耦合器  $Q_c$  计算公式为



(a) MP's position

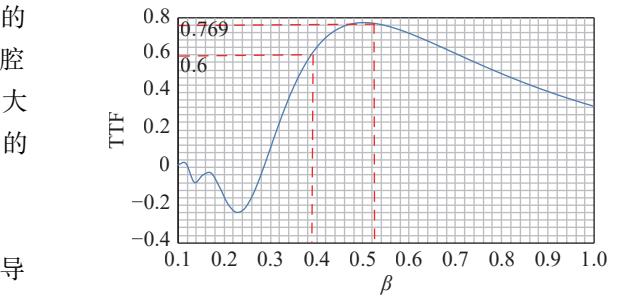


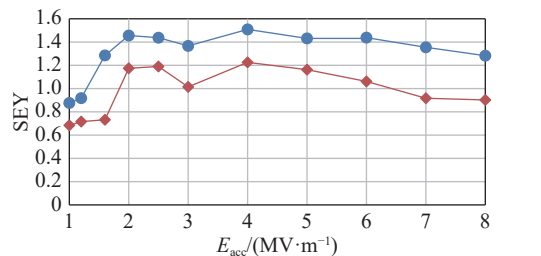
Fig. 4 TTF distribution of DSR

图 4 双 spoke 腔 TTF 分布

表 2 双 spoke 腔的基模频率和高次模频率

Table 2 Fundamental model frequencies and high order mode frequencies of double spoke resonator (DSR)

model	frequency/MHz
1	324
2	354
3	386
4	503
5	505
6	548
7	603
8	604
9	613
10	658



—●— 300° Celsius bakeout —◆— Ar discharge cleaned

(b) SEY curves of different materials

Fig. 5 MP's position and SEY simulation of different materials

图 5 MP 易发生的位置及不同材料 SEY 曲线仿真

$$Q_e = \frac{V_c Q}{R I_b} \quad (1)$$

式中： $V_c = N\beta_0\lambda/2$ 。双 spoke 腔加速间隙为 3 个，在本设计中  $N=3$ ,  $\beta_0=0.5$ ，经计算  $Q_e=233\ 000$ 。为减少耦合器二次电子倍增效应，保护脆弱的真空陶瓷的安全，经过参数优化耦合器采用  $75\ \Omega$  特征阻抗设计，耦合器内径  $80\ \text{mm}$ ，天线直径为  $22.8\ \text{mm}$ ，以天线顶部与腔体内表面齐平为基准，深入腔体长度为  $H$ 。经过计算，天线的  $Q_e$  曲线如图 6 所示。考虑到误差，选择  $H$  为  $6\ \text{mm}$  来进行耦合器的设计。

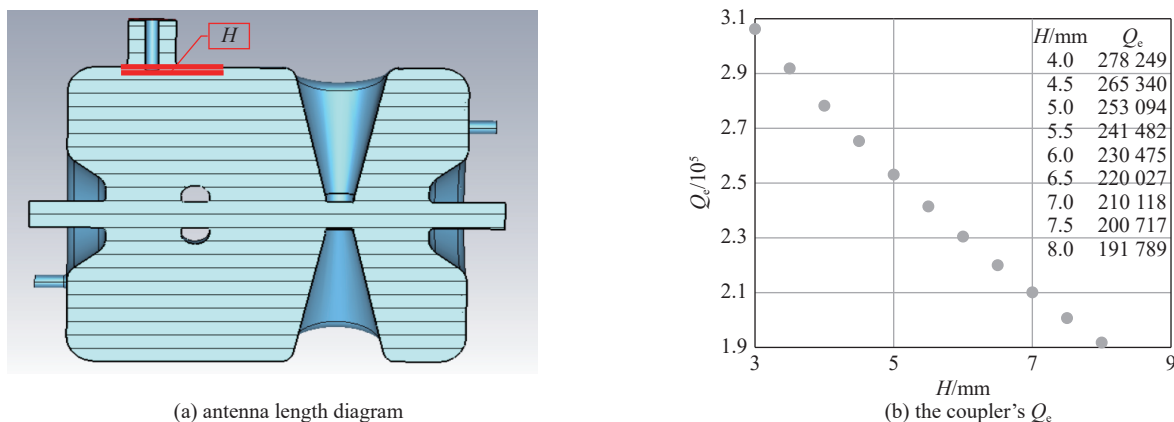


Fig. 6 Simulation calculation of coupler antenna and  $Q_e$

图 6 耦合器天线及  $Q_e$  仿真计算

## 2 机械设计

超导腔的机械设计是在保证基本电磁参数的基础上，通过合理的设计使腔在动态工作环境中达到稳定运行的目标需求，机械设计主要目标是：减小由于电磁场洛伦兹力引起的腔体失谐；减小由于氦压波动带来的频率变化 ( $df/dp$ )；调谐灵敏度最优化：10 kN 的力能调谐频率  $> 100\ \text{kHz}$ ；在常温下的检漏及工作中腔不会发生塑性形变；确保腔的机械振动本征模频率  $> 100\ \text{Hz}$ ；满足超导腔的后处理 (BCP、HPR、腔串洁净组装) 要求。

使用的材料 (铌材、钛材、铌钛合金) 性质在不同的温度下有些许变化，设计材料的数据均来自费米实验室<sup>[11]</sup>，具体参数如表 3 所示。

表 3 材料在不同温度下的参数

Table 3 Material parameters at different temperatures

material	Young's modulus/GPa		yield strength/MPa		limit strength/MPa		density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Poisson's ratio
	295 K	4 K	295 K	4 K	295 K	4 K		
Ti	106	117	275	834	344	1117	4500	0.34
Nb	105	118	70	699	185	742	8560	0.39
Nb55Ti	62	68	476	476	545	545	6366	0.34

腔槽机械设计采用 CST 多物理模块和 COMSOL 多物理仿真软件进行仿真设计。氦槽结构如图 7 所示。各部分所用材料是：腔体采用厚度为  $1.3\ \text{mm}$  的 RRR 为 300 的高纯铌，槽体以  $4\ \text{mm}$  厚的钛材为主，氦槽端盖进行了局部优化，腔槽间采用铌钛合金进行焊接，法兰采用铌钛合金。

### 2.1 调谐灵敏度及应力优化

双 spoke 腔工作运行时要求调谐量  $> 100\ \text{kHz} @ 10\ \text{kN}$ 。腔调谐主要是通过调整加速间隙的距离来改变整个腔的谐振频率，本文设计通过拉伸束管法兰来进行调整，因此液氦槽端盖的设计与调谐量的大小有着直接关系。由于空间限制，调谐器只能通过单端调谐，造成调谐难度比较大。

首先通过对端盖部分各个参数进行扫描，找出敏感参数。对端盖铌钛环内外侧钛板厚度分别进行扫描，发现如下规律：当端盖加强筋和铌钛环半径越小时、铌钛环内侧钛板越薄时调谐量越大，但是腔体端盖在真空检漏时所受的应力也相应越大，所以调谐量与腔体表面应力是相互矛盾的，只能采取折中方案达到合理范围。

由于真空检漏时，整个腔端盖外表面都会受到  $0.1\ \text{MPa}$  压力，应力最大的地方是淋洗口内侧见图 8(a)，为减少此处的应力，将淋洗口内侧对应的加强筋去除一部分，形成图 8(b) 所示半弧形结构，这样既减小了淋洗口应力同

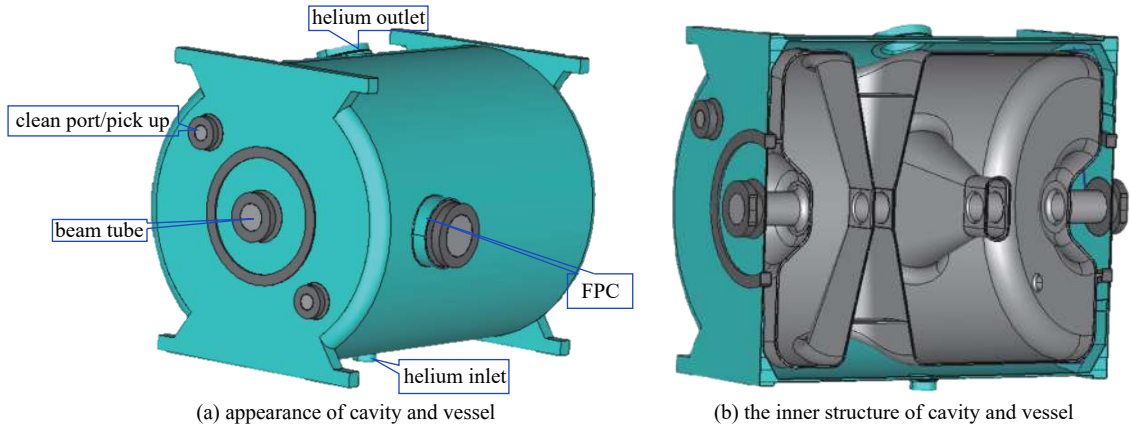


Fig. 7 The mechanical structure of DSR

图 7 双 spoke 腔槽结构

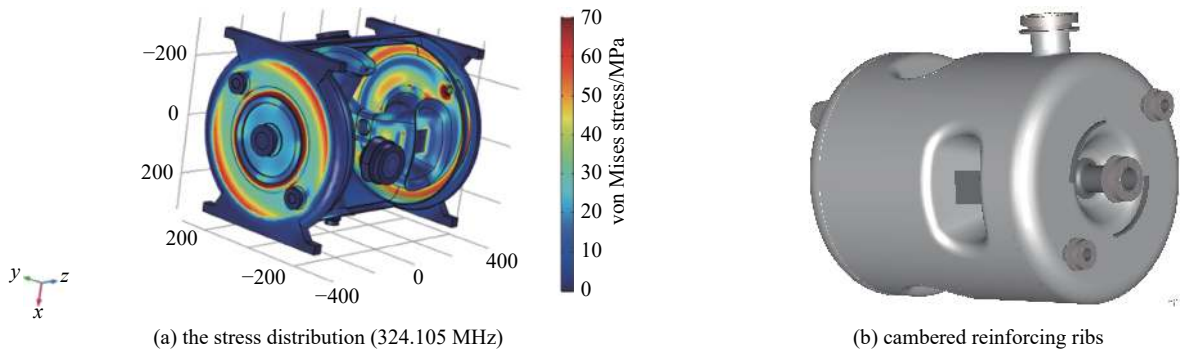


Fig. 8 Stress distribution of DSR and cambered reinforcing ribs

图 8 腔的应力分布与端盖半弧形加强筋结构

时又增加了调谐量。

## 2.2 氦压灵敏度 ( $df/dp$ ) 优化

由于超导双 spoke 腔在 2 K 液氮中  $Q$  值很高, 氦压的波动会直接影响到腔的形态变化, 进而引起谐振频率的变化, 因此要将氦压灵敏度降到最低, 以减少氦压带来的频率失谐。

$$df = (\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2) dV \quad (2)$$

由于电磁场区域的形变对频率会产生不同的影响, 因此理论上可以通过调整腔的形变使氦压灵敏度能降到 0。在已经确定端盖结构的基础上可以通过调整 spoke 柱内的加强板位置进行优化  $df/dp$ 。经过优化当 spoke 柱加强板位于距离束线中心 200 mm 处时  $df/dp$  最优为  $-0.773 \text{ Hz}/100 \text{ Pa}$ 。

## 2.3 洛伦兹力失谐计算

超导腔在谐振状态工作时内表面会产生电磁作用力, 会导致腔体形变而失谐, 称之为洛伦兹力失谐。洛伦兹力产生的压强为

$$p = (\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2) / 4 \quad (3)$$

它导致的腔频率发生变化叫洛伦兹力失谐(LFD)。通常用 LFD 系数表示失谐量与腔体加速电场的关系, 表征了腔体设计的特性, 表达式为

$$K_L = \Delta f / E_{acc}^2 \quad (4)$$

根据 CST 及 COMSOL 拟合计算(图 9)  $K_L = -12.54 \text{ Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$ 。

## 2.4 麦克风效应

麦克风效应是外界的机械振动与超导腔发生共振引起超导腔形变, 从而引起超导腔频率的失谐。理论上麦克风效应在低频时对腔影响最大, 并且由于腔在轴向上的加速间隙的变化对频率最敏感, 所以超导腔在得到充分约束的情况下, 共振只要不引起腔轴向共振一般不会对频率产生影响。由于外界机械振动频率多为 100 Hz 以下的

低频振动,因此理论上超导腔的本征机械频率提升到 100 Hz 以上,可以减弱振动对腔体的频率影响,降低低电平控制系统(LLRF)的要求。

以液氦进口为固定点,束管自由状态下,用 COMSOL多物理仿真模块对整个模型进行 200 Hz 以下机械本征振动频率、模式的计算(见表 4 及图 10)。其中模式 1 至模式 4、模式 7 是腔槽整体旋转,不会影响腔体的频率;而模式 5 尽管在 z 轴上有振动,但两个束管是相同方向,也不会影响腔的频率;模式六两个束管是相对振动,会对频率产生较大的影响,但其振动频率为 174.7 Hz,距离 100 Hz 比较远,带来的影响比较小。

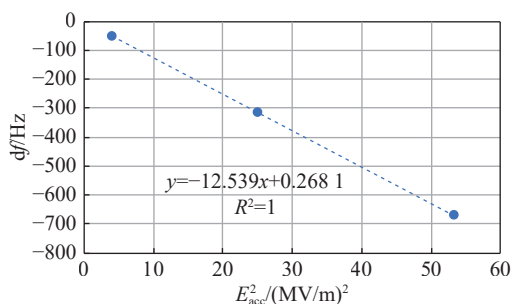


Fig. 9 LFD coefficient of DSR

图 9 LFD 系数的拟合

表 4 各个模式振动方式  
Table 4 Vibration direction of each model

model	vibration model	vibration frequency/Hz
1	z-axis rotation	3.0
2	y-axis rotation	3.4
3	z-axis rotation	13.7
4	transverse vibration	34.3
5	z-axis simultaneous vibration	167.6
6	z-axis anisotropic vibration	174.7
7	z-axis rotation	196.3

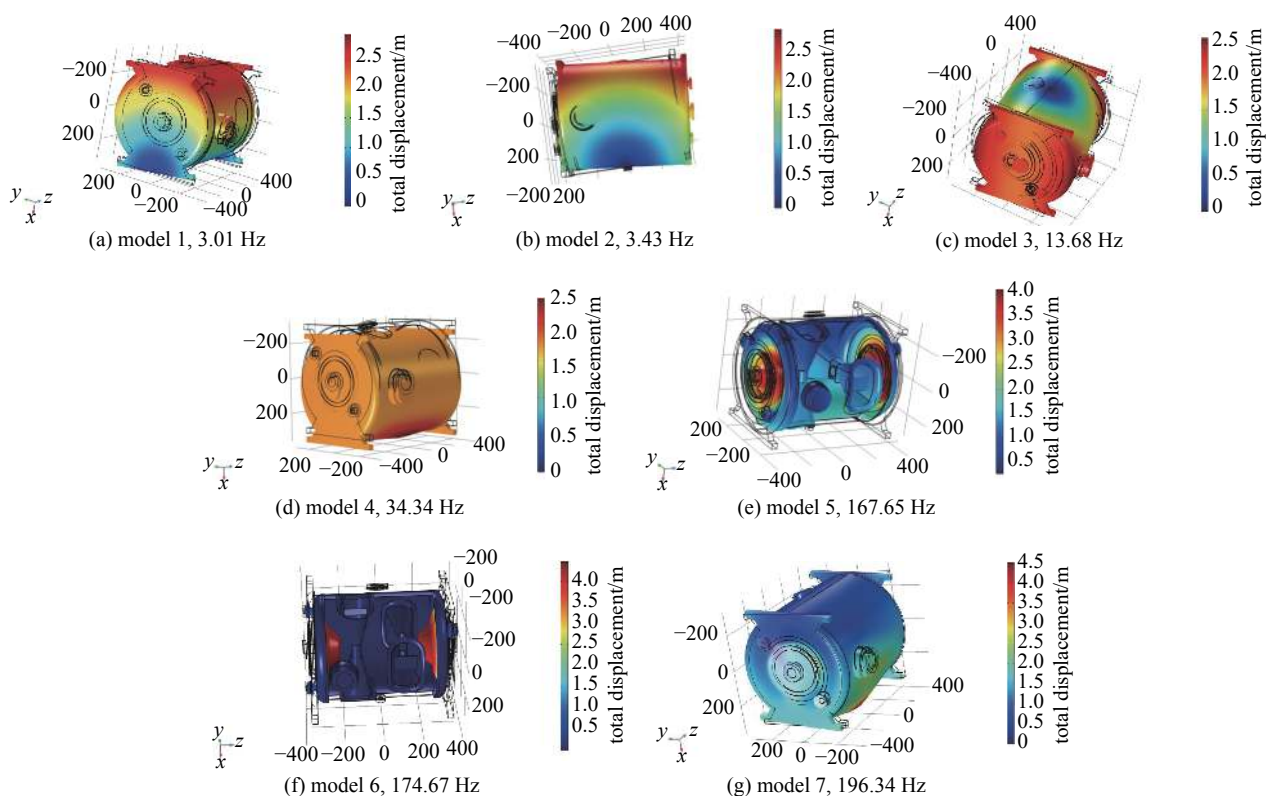


Fig. 10 Mechanical intrinsic frequency and vibration mode of DSR

图 10 双 spoke 腔本征机械频率及振动方式

## 2.5 磁屏蔽的设计

当铌腔由 293 K 常温非超导态向 9.2 K 超导态转变时,由于超导材料的非理想性(机械加工、焊接、后处理过程引入的杂质及缺陷),其中存在的杂质或缺陷对外界的磁场形成钉扎效应,导致表面电阻的增加,进而影响腔的整体性能。这些钉扎区域就会成为引起超导腔失超的薄弱环节。

根据超导腔经验公式<sup>[9,12]</sup>,铌腔的表面电阻

$$R_s = R_{BCS}(T) + R_0 = R_{BCS}(T) + R_{mag} + R_{res} \quad (5)$$

$$R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left( \frac{f}{1.5} \right)^2 \exp\left( -\frac{17.67}{T} \right) \quad (6)$$

$$R_{\text{mag}} = 0.3B_{\text{ext}}\sqrt{f}(\text{n}\Omega) \quad (7)$$

式中:  $f$  单位为 GHz,  $B_{\text{ext}}$  单位为  $10^{-7}$  T。

双 Spoke 腔运行在 2 K 液氦的环境中, 其  $R_{\text{BCS}}=0.68 \text{ n}\Omega$ , 而对整腔电阻起决定作用的是  $R_0$ , 其中  $R_{\text{res}}$  是由材料本身性质及后处理工艺决定, 影响较大的  $R_{\text{mag}}$  是由地磁场和工作频率决定的。在实际工作中, 地磁场一般在  $5 \times 10^{-5}$  T 左右, 若不对其进行屏蔽, 在 324 MHz 工作频率下,  $R_{\text{mag}}=85.4 \text{ n}\Omega$ , 则对腔的运行会带来灾难性的后果。因此需要将腔所处的地磁环境限定到合理范围内。理论上若腔的  $Q_0$  达到  $1 \times 10^{10}$  以上, 则  $R_s$  要小于  $10 \text{ n}\Omega$ , 根据超导腔实际运行经验, 则  $B_{\text{ext}}$  必须小于  $2 \times 10^{-6}$  T。

由于地球上各地的磁场不是平均分布的, 会随着地理环境发生局部改变, 因此在设计磁屏蔽时要参考装置地的地磁环境及超导腔的安装方向。装置地的地磁强度约为  $45731.3 \text{ nT}$ , 磁倾角为  $-3^\circ 21'$ 。根据地磁倾角和加速器安装位置, 对地磁  $x/y/z$  方向进行分解 (图 11)。本文的设计采用通用的  $1.3 \text{ mm}$  厚 1J79 坡莫合金, 其在低温下具有良好的磁导率和软磁特性。

利用 CST 静磁场求解器对磁屏蔽进行仿真计算, 最终优化模型见图 12(a), 其中心轴线剩磁约  $1.6 \times 10^{-6}$  T 见图 12(b)。若腔壁按平均  $2 \times 10^{-6}$  T 计算,  $R_{\text{mag}}=3.42 \text{ n}\Omega$ , 满足设计要求。

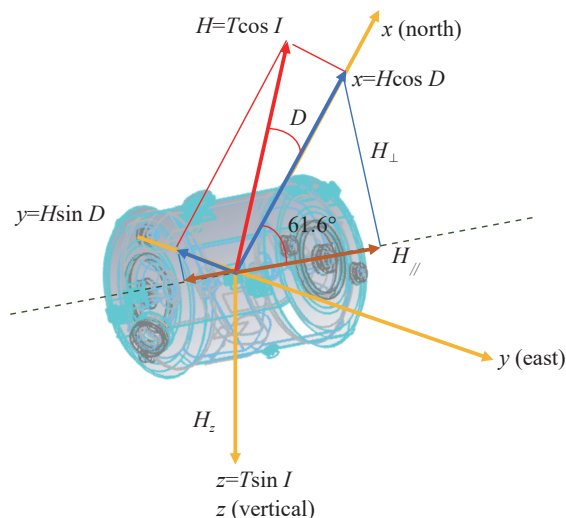
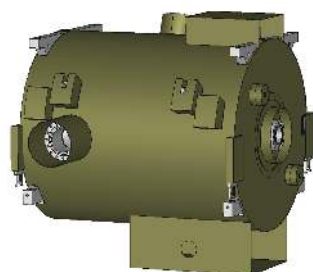
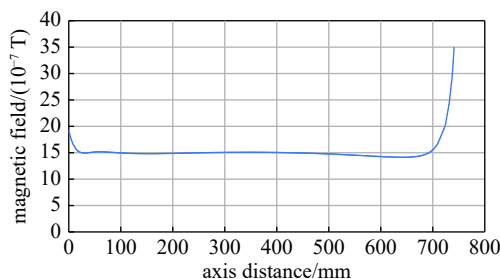


Fig. 11 Decomposition of the earth magnetic field

图 11 装置地地磁场分解



(a) magnetic shield structure



(b) axial distribution of residual magnetic field

Fig. 12 Design of magnetic shield and distribution of residual magnetic field in axis of DSR

图 12 双 spoke 超导腔磁屏蔽结构和轴线剩余磁场分布

## 2.6 焊接及后处理设计

由于双 spoke 腔结构比较复杂, 在设计中考虑到以下几方面: 确保腔各部分机加工精度和尽量减少焊接工艺难度; 缓冲化学抛光 (BCP) 时要考虑酸洗的均匀性及 BCP 过程中产生氢气的排放; HPR 时要保证腔内不存在清洗盲区。

腔的机械结构进行了以下设计, 见图 13: (1) 腔两个端盖分别增加两个淋洗口, 并成  $90^\circ$  交错分布, 便于腔进行 BCP 时酸液的进出、气体排放和 HPR 无盲区清洗<sup>[13-16]</sup>。(2) 外导体上无多余开孔, 便于电磁场的均匀分布和减少洁净组装时腔受污染的概率。(3) 减少 spoke 柱基部的宽度, 使外导体能分成两半便于 spoke 柱的焊接, 减少焊接工艺难度, 易于批量化生产。



Fig. 13 Welding diagram of DSR

图 13 双 spoke 腔焊接示意图

## 3 结论

本文阐述了中国散裂中子源二期升级方案, 着重叙述了双 spoke 腔的电磁参数优化及腔槽机械设计, 在设计中结合工程实际工艺特点针对性地进行了优化, 使之不仅满足束流动力学的加速腔压要求, 长期稳定地工作, 并且在制造中减少了加工难度, 为批量化生产打下基础。项目下一步工作将是对整个机械加工过程进行严格品控, 使超导腔的性能达到最优化。



参考文献：

- [1] Hopper C S, Park H. High-velocity spoke cavities[C]//Proceedings of SRF2015. 2015: 943-947.
- [2] Hopper C S, Delayen J R. Superconducting spoke cavities for high-velocity applications[J]. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 2013, 16: 102001.
- [3] Krawczyk F L, Chan K C D, Gentzlinger R C, et al. An integrated design for a  $\beta=0.175$  spoke resonator and associated power coupler[C]//Proceedings of the 8th European Particle Accelerator Conference. 2002: 272-274.
- [4] Zaplatin E. Multi-spoke cavity end region analysis[C]//Proceedings of the 12th International Workshop on RF Superconductivity. 2005: 337-341.
- [5] Jiang T C, Xiong P R, Li C L, et al. Development of a superconducting double-spoke cavity at IMP[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 2869-2871.
- [6] 周全. 高性能超导双spoke腔的物理与实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. (Zhou Quan. Physical and experimental studies of high performance superconducting double spoke cavity[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021)
- [7] Delayen J R, De Silva S U, Hopper C S. Design of superconducting spoke cavities for high-velocity applications[C]//Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference. 2011: 1024-1026.
- [8] Delayen J R. Low and intermediate beta cavity design—a tutorial[C]//Proceedings of the 11th Workshop on RF Superconductivity. 2015: 486-495.
- [9] Padamsee H, Knobloch J, Hays T. RF superconductivity for accelerators[M]. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [10] Zheng Hongjuan, Zhang Pei, Li Zhongquan, et al. Design optimization of a mechanically improved 499.8-MHz single-cell superconducting cavity for HEPS[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31: 3500109.
- [11] Merio M. Material properties for engineering analyses of SRF cavities[M]. Fermi National Accelerator Laboratory, 2011.
- [12] Ginsburg C M, Reid C, Sergatskov D A. Magnetic shielding for the Fermilab vertical cavity test facility[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, 19(3): 1419-1422.
- [13] Jung Y, Joung M, Hyun M O, et al. Analysis of high pressure rinsing characteristics for SRF cavities[C]//Proceedings of SRF2015. 2015: 414-417.
- [14] Guo H, Xiong P R, Shi Z X, et al. Study on local chemical treatment for recovery from surface oxidation by HPR process on SRF cavities[C]//18th International Conference on RF Superconductivity. 2017: 592-594.
- [15] Jones T, Pattalwar S, Burt G, et al. Determining BCP etch rate and uniformity in high luminosity LHC crab cavities[C]//18th International Conference on RF Superconductivity. 2017: 635-639.
- [16] Boffo C, Elementi L, Terechkine Y. Facility for chemical polishing of superconducting niobium RF cavities[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005, 15(2): 2401-2404.