



·粒子束及加速器技术·

中国散裂中子源二期 648 MHz 超导腔调谐器设计

刘 铭^{1,3,4}, 米正辉^{1,3,4}, 潘卫民^{1,3,4}, 葛 锐^{1,3,4}, 贺斐思^{1,3,4},
周文中^{1,2,3,4}, 徐妙富^{1,3}, 王子哈^{1,3,4}

(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. 中国科学院粒子加速器物理与技术重点实验室, 北京 100049; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 中国散裂中子源二期升级采用超导腔技术方案, 其中在 165~300 MeV 能量段采用 648 MHz 6-cell 超导腔模组, 每个模组中集成 3 只 6-cell 超导腔。超导腔工作在脉冲模式, 为了保证超导腔 2 K 下的频率满足运行要求, 每只超导腔需要一套低温调谐器对其频率进行精确调节控制。针对 648 MHz 6-cell 超导腔的结构和运行特点进行了低温调谐器的设计, 采用快慢组合机构补偿超导腔的频率偏移, 对调谐器的基本性能和超导腔脉冲模式运行下的动态洛伦兹失谐进行了分析。

关键词: 超导腔; 调谐器; 动态洛伦兹失谐; 压电陶瓷

中图分类号: TL503.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230227

Design of 648 MHz superconducting cavity tuner for China Spallation Neutron Source phase II

Liu Ming^{1,3,4}, Mi Zhenghui^{1,3,4}, Pan Weimin^{1,3,4}, Ge Rui^{1,3,4}, He Feisi^{1,3,4},
Zhou Wenzhong^{1,2,3,4}, Xu Miaofu^{1,3}, Wang Zihan^{1,3,4}

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

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

3. Key Laboratory of Particle Accelerator Physics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

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

Abstract: The China Spallation Neutron Source phase II (CNSS-II) is upgraded with superconducting cavity technology, which uses 648 MHz 6-cell superconducting cavity module in the energy range of 165–300 MeV. Three 6-cell superconducting cavities are integrated in each module. The superconducting cavity works in pulse mode. To ensure that the frequency of the superconducting cavity meets the operation requirements at 2 K, each superconducting cavity needs a set of low-temperature tuner to precisely adjust and control its frequency. According to the structure and operation characteristics of the 648 MHz 6-cell superconducting cavity, a low-temperature tuner is designed. The frequency offset of the superconducting cavity is compensated by a fast-slow combination mechanism. The basic performance of the tuner and the dynamic Lorentz detuning of the superconducting cavity in pulse mode are analyzed.

Key words: superconducting cavity, tuner, dynamic Lorentz detuning, piezoelectric ceramics

中国散裂中子源二期(CSNS-II)升级改造工 程已列入国家十四五重大科技基础设施建设规划, 直线段束流能量由 80 MeV 升级到 300 MeV, 其中 165~300 MeV 能量段采用 24 只频率为 648 MHz、几何参数 $\beta_g = 0.62$ 的 6-cell 椭球腔加速粒子^[1]。超导腔运行过程中由于洛伦兹力失谐、氦压波动、机械振动、束流负载等内外因素导致超导腔频率产生偏移^[2], 频率偏移越大超导腔所需发射机输出功率越大^[3], 需要一套频率调谐系统对超导腔频率进行精确调节和控制, 降低对发射机输出功率的要求。特别是对于本项目中的超导腔采用脉冲模式运行(脉冲频率为 25 Hz, 脉冲平顶时间为 600 μ s), 动态洛伦兹力是超导腔运行时频率失谐的主要因素, 需要对其进行有效补偿^[4-5]; 此外, 每个模组集成三只超导腔, 每只超导腔都需要一套调谐器, 安装在较为紧凑的空间内, 并保证在真空、低温、辐射的

* 收稿日期: 2023-07-21; 修订日期: 2023-09-04

基金项目: 中国科学院青年创新促进会-人才支撑体系专项(292022000038)

联系方式: 刘 铭, mliu@ihep.ac.cn。

通信作者: 米正辉, mizh@ihep.ac.cn。

环境中能够高精度的工作。

1 频率偏移

腔所需发射机输出功率与频率偏移量的关系为

$$P_g = \frac{V_c^2}{4Q_L R/Q} \left[\left(1 + \frac{R}{Q} \frac{Q_L I_b}{V_c} \sin \phi_s \right)^2 + \left(2Q_L \frac{\Delta f}{f_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: P_g 表示超导腔所需发射机功率; V_c 表示腔压; Q_L 表示超导腔有载品质因数; R/Q 表示超导腔特征阻抗; I_b 表示束流流强; ϕ_s 表示加速相位; f_0 表示超导腔工作频率。图1为腔输入功率需求随频率失谐量的变化图。

2 调谐器设计需求

调谐器的刚度会对超导腔系统的刚度产生影响,增加调谐器的刚度能提高超导腔系统的整体机械强度,从而减小洛伦兹力失谐系数、降低洛伦兹力对超导腔频率的影响。对于工作在脉冲模式的超导腔,动态洛伦兹力失谐通常是最主要的失谐因素^[6-8]。通过COMSOL软件对调谐器的刚度进行仿真优化,如图2所示,洛伦兹力失谐随着调谐器刚度的增加而近似指数级减小,当调谐器刚度增加到100 kN/mm后,洛伦兹力失谐的变化不再明显。因此,综合考虑调谐器所需空间、安装和维护性,调谐器的刚度控制在100 kN/mm左右。另外,在调谐器的设计中还需要综合考虑超导腔的运行参数等其他因素。

超导腔运行主要参数如表1所示。

表1 超导腔运行主要参数

Table 1 Superconducting cavity operating parameters

working frequency/MHz	bandwidth of cavity/Hz	operation mode	pulse frequency/Hz	operating gradient/(MV·m ⁻¹)
648	668	pulse	25	14
K_L /(Hz·m ² ·MV ⁻²)	pressure sensitivity/(Hz·Pa ⁻¹)	field flatness	(R/Q)/Ω	beam current/mA
1.5	0.15	> 90%	310	40
operation temperature/K	operation pressure/Pa	maximum allowable working pressure/MPa	cavity axial stiffness/(N·mm ⁻¹)	tuning sensitivity/(kHz·mm ⁻¹)
2	3 100	0.2(room temperaturer), 0.4(2 K)	2225	171

为了满足超导腔频率调谐范围和调谐速度的要求,窄带宽腔的调谐系统由串联的快慢调谐机构组成。慢调谐机构利用机械系统在液氮槽和空腔法兰之间施加力来挤压或拉伸空腔,将步进电机的旋转转换为线性行程;快调谐采用调谐范围有限但分辨率和响应速度高的压电陶瓷,快调谐系统用于由于氦气压力波动、洛伦兹力或其他外部扰动(麦克风效应)引起腔频率失谐的主动补偿^[9]。在本项目中主要是对动态洛伦兹力引起的超导腔频率偏移进行快速补偿。

慢调谐器主要用于降温后将腔调至谐振频率,补偿降温及加工不确定性导致的频率差,范围大约为50 kHz。当腔因故障需要进行主动失谐,则慢调系统必须能够将超导腔的频率调制距谐振至少100倍带宽的位置(≈66.8 kHz),保证超导腔系统的安全和束流的稳定。调谐范围要求考虑2.0的安全裕度,慢调器应能够将腔体长度更改约0.6 mm(超导腔的调谐灵敏度为171 kHz/mm)。

频率快调谐需要精度为4 Hz(或腔长变形量23.5 nm)^[10],系统响应速度ms量级。考虑到慢调谐系统的齿隙和滞后,慢调系统的分辨率要设置为10 Hz,响应速度s量级,单独的慢调系统不能提供所需的腔调谐精度和速度。

另外,由于步进电机运动会引起腔体振动,因此在超导腔束流运行期间只通过快调谐补偿腔体频率变化。调

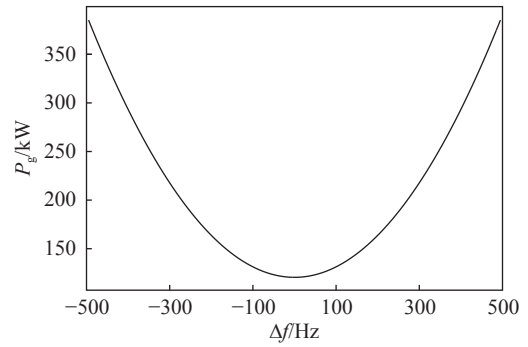


Fig. 1 Variation of cavity input power demand with frequency detuning

图1 腔输入功率需求随频率失谐量的变化图

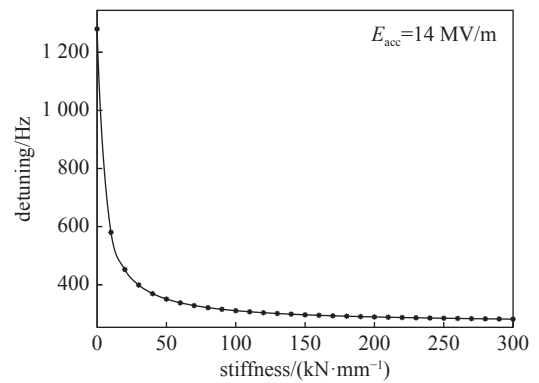


Fig. 2 Plot of superconducting cavity Lorentz force detuning versus tuner stiffness

图2 超导腔洛伦兹力失谐随调谐器刚度变化图

谐器需要满足:

- 所需的调谐范围 > 100 kHz;
- 补偿由于氦压波动产生的频率偏移

$$\Delta f_{df} = \frac{df}{dp} \Delta p \approx \pm 15 \text{ Hz} \quad (2)$$

式中: df/dp 为超导腔氦压灵敏度; Δp 为氦压波动量。

- 补偿洛伦兹力失谐

$$\Delta f_L = -K_L E_{acc}^2 \approx -290 \text{ Hz} \quad (3)$$

式中: K_L 表示超导腔洛伦兹力失谐系数。

- 补偿束流负载引起的频率偏移

$$\Delta f_b = -\left(\frac{I_b \sin \phi_s}{2V_c}\right) \frac{R}{Q} f \approx -115 \text{ Hz} \quad (4)$$

表 2 为 648 MHz 超导腔调谐器主要参数。

表 2 调谐器系统需求参数

Table 2 Tuner system requirement parameters

tuner system stiffness/(kN·mm ⁻¹)	slow tuner frequency range/kHz	stepper motor resolution/Hz	piezo tuner frequency range/kHz	piezo tuner resolution/Hz
> 100	> 100	10	1	4

3 调谐器结构设计

调谐器的工作原理如图 3 所示, 步进电机通过齿轮箱驱动导杆, 导杆依次驱动比例为 1:50 的杠杆的一端。压电陶瓷位于腔体轴向, 上下各安装一个, 直接作用于调谐器与腔体的连接环。

调谐器的三维模型如图 4 所示。驱动慢速调谐器的机电调谐器由一个集成的步进电机/变速箱/导螺杆组成^[1]。快调谐器由两个独立的压电陶瓷组成, 压电陶瓷一端与连接环相切, 另一端固定插入调谐臂中, 用固定螺母进行固定。在没有驱动电压的情况下, 调谐器只是将力从慢调谐器传递到腔体。当电压施加到压电陶瓷时, 会在腔体上施加额外的力, 以实现对腔体频率的快速精确控制。需要同时驱动两个压电陶瓷, 达到对腔体压力和位移的最佳传递。

调谐器的工作原理为: 慢调谐时, 驱动控制器向步进电机发送脉冲信号, 步进电机根据脉冲信号转动一定角度, 带动电机螺杆向前移动一定位移, 进而带动调谐臂转动。调谐臂将力传递给调谐器主臂, 主臂上的压电陶瓷将力传递给调谐器连接环, 从而使超导腔发生拉伸或压缩, 实现对超导腔频率的调节; 快调谐时, 压电陶瓷驱动器给压电陶瓷驱动一个高压信号, 压电陶瓷产生一定位移, 作用到调谐器连接环对腔进行压缩, 从而对腔频率进行调节。

4 调谐效率分析

根据调谐器、腔体、液氦槽各个部件的刚度, 以及调谐器受力分析计算快调谐和慢调谐的调谐效率^[2]。使用 ANSYS Workbench 软件对超导腔系统进行力学分析。对调谐器刚度

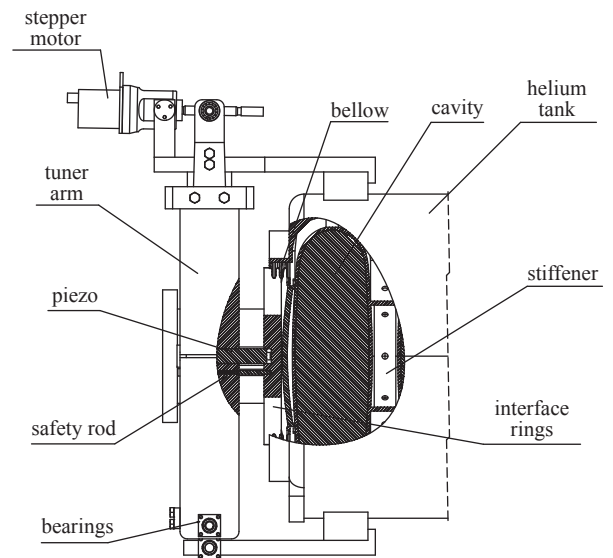


Fig. 3 Schematic of tuner design model

图 3 调谐器设计模型原理图

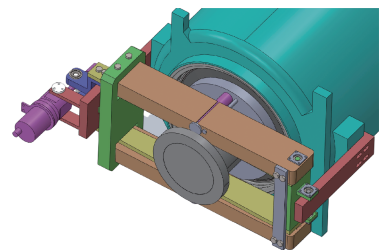


Fig. 4 Diagram of tuner 3D model

图 4 调谐器 3D 模型图

和最大应力进行计算, 图 5 显示了调谐器的简化 ANSYS 实体模型, 以及仿真后的位移变化和应力分布结果。
对超导腔系统进行机械特性仿真计算, 所得结果见表 3。

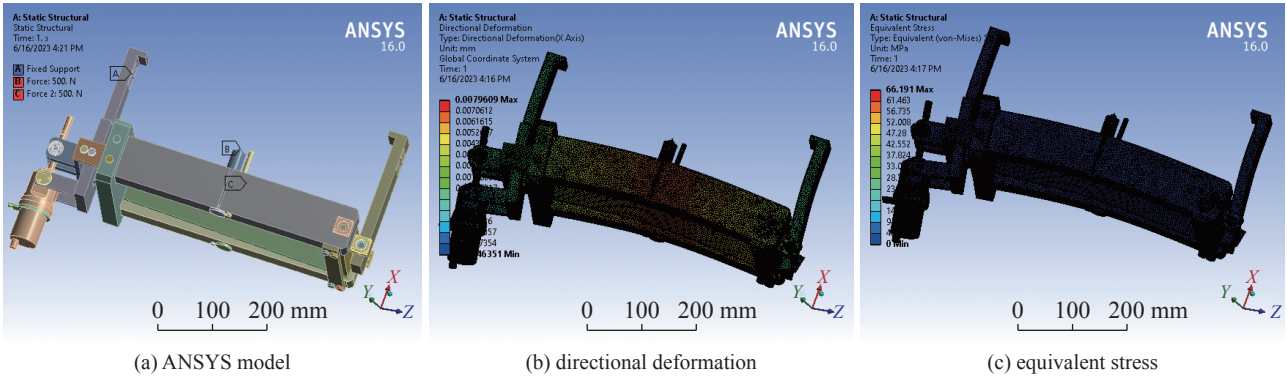


Fig. 5 Simulation analysis of tuner mechanical characteristics

图 5 调谐器机械特性仿真分析

表 3 648 MHz 超导腔机械特性

Table 3 Mechanical properties of 648 MHz superconducting cavity

parts	material	axial flexibility/(mm·kN ⁻¹)	axial rigidity/(kN·mm ⁻¹)
cavity	Nb	0.4494	2.225(K_c)
front washer disk	Nb55Ti	0.0339	29.52(K_{w1})
end washer disk	Nb55Ti	0.01914	52.24(K_{w2})
helium tank	Ti	0.008996	111.16(K_h)
tuner bellow	Ti	32.327	0.031(K_b)
tuner	316L	0.00796	125.61(K_t)
interface rings	Ti	0.00196	509.68(K_i)
piezo actuator	HP	0.0125	80(K_p)

4.1 慢调谐效率分析

在机械调谐慢调谐阶段, 通过给步进电机脉冲信号, 使步进电机产生位移, 带动机械调谐器系统产生位移 (δ_t)。此时, 腔被拉伸(或压缩), 液氮槽被压缩(或拉伸), 整个系统稳定后处于平衡状态^[13]。图 6 为机械调谐轴向刚度模型图。

将模型简化, 通过 K_{w1} 和 K_h 得到液氮槽整体的轴向刚度为

$$K_{wh} = \frac{K_{w1}K_h}{K_{w1} + K_h} = 23.33 \text{ kN/mm} \quad (5)$$

通过 K_b 和 K_{w2} 得到波纹管整体的轴向刚度为

$$K_{bw} = \frac{K_bK_{w2}}{K_b + K_{w2}} = 0.031 \text{ kN/mm} \quad (6)$$

通过 K_p 和 K_i 得到压电陶瓷整体轴向刚度为

$$K_{ip} = \frac{2K_pK_i}{2K_p + K_i} = 121.77 \text{ kN/mm} \quad (7)$$

简化后的机械调谐轴向刚度模型如图 7 所示。

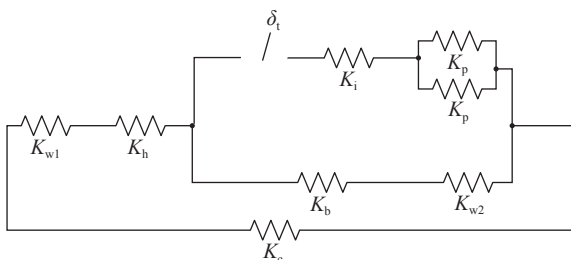


Fig. 6 Diagram of mechanical tuning axial model

图 6 机械调谐轴向模型图

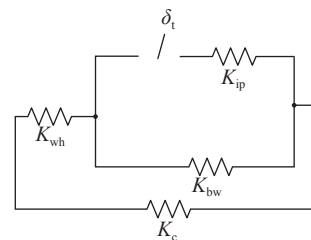


Fig. 7 Diagram of mechanical tuning axial simplified model

图 7 机械调谐轴向简化模型图

通过对模型进行分析,可以得到系统的平衡方程为

$$\begin{cases} \delta_c = \delta_t + \delta_{wh} + \delta_{ip} \\ \delta_{bw} + \delta_t + \delta_{ip} = 0 \\ F_c = K_c \delta_c \\ F_{wh} = K_{wh} \delta_{wh} \\ F_{ip} = K_{ip} \delta_{ip} \\ F_{bw} = K_{bw} \delta_{bw} \\ F_{wh} = -F_c \\ F_{wh} = F_{ip} - F_{bw} \end{cases} \quad (8)$$

式中: δ_c 、 δ_t 、 δ_{wh} 、 δ_{bw} 、 δ_{ip} 分别表示超导腔、调谐器、液氦槽和前端板整体、波纹管 and 后端板整体、压电陶瓷和调谐器连接环整体的位移变化; F_c 、 F_{wh} 、 F_{bw} 、 F_{ip} 分别表示超导腔、液氦槽和前端板整体、波纹管 and 后端板整体、压电陶瓷和调谐器连接环整体所受到的力。

通过解以上方程,可以求得系统任意一部分与调谐器产生的位移 δ_t 的关系为

$$\begin{cases} \Delta = K_{ip}K_{wh} + K_{bw}(K_c + K_{wh}) + K_c(K_{ip} + K_{wh}) \\ F_{ip} = -\frac{K_{ip}[K_c K_{wh} + K_{bw}(K_c + K_{wh})]}{\Delta} \delta_t \\ F_{bw} = -\frac{K_{ip}K_{bw}(K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_t \\ F_{wh} = -\frac{K_{ip}K_c K_{wh}}{\Delta} \delta_t \\ F_c = \frac{K_{ip}K_c K_{wh}}{\Delta} \delta_t \\ \delta_{ip} = -\frac{K_c K_{wh} + K_c(K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_t \\ \delta_{bw} = -\frac{K_{ip}(K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_t \\ \delta_{wh} = -\frac{K_{ip}K_c}{\Delta} \delta_t \\ \delta_c = \frac{K_{ip}K_{wh}}{\Delta} \delta_t \end{cases} \quad (9)$$

当机械调谐器产生位移 $\delta_t = 1 \mu\text{m}$ 时,超导腔各部分轴向受力和位移情况见表4。

表4 机械调谐器产生1 μm 位移时各部件受力及位移状态表

Table 4 Force and displacement status of each component, when the mechanical tuner produces a displacement of 1 μm

parts	force/N	displacement/ μm
piezo actuator/interface rings	-2.03	-0.017
tuner bellow/end dishes	-0.03	-0.980
helium tank/Front dishes	-2.00	-0.086
cavity	2.00	0.898

通过以上分析,机械调谐器在调谐过程中,位移有89.8%传递给腔,机械调谐器的调谐效率为89.8%。

4.2 快调谐效率分析

在快速调谐阶段,采用驱动器驱动压电陶瓷,使其产生 μm 量级位移用于补偿由于束流负载、麦克风效应、洛伦兹力失谐、氦压波动等引起的超导腔频率偏移。假设压电陶瓷位移为 δ_p ,超导腔将会被压缩,液氦槽被拉伸。当整个系统平衡后,处于平衡状态,如图8所示,可以看出系统轴向刚度之间的关系。

将模型简化,通过 K_{w1} 和 K_h 得到液氦槽整体的轴向刚度为

$$K_{wh} = \frac{K_{w1}K_h}{K_{w1} + K_h} = 23.33 \text{ kN/mm} \quad (10)$$

通过 K_b 和 K_{w2} 得到波纹管整体的轴向刚度为

$$K_{bw} = \frac{K_b K_{w2}}{K_b + K_{w2}} = 0.031 \text{ kN/mm} \quad (11)$$

通过 K_t 和 K_i 得到机械调谐器整体轴向刚度为

$$K_{it} = \frac{K_t K_i}{K_t + K_i} = 100.77 \text{ kN/mm} \quad (12)$$

简化后的快调谐系统轴向刚度模型如图 9 所示。

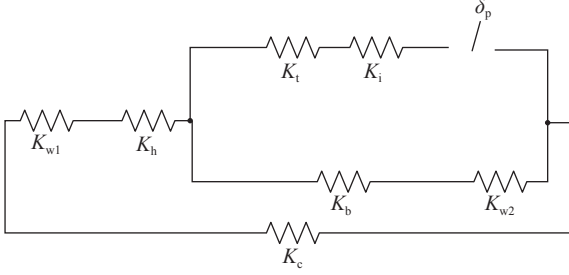


Fig. 8 Diagram of piezoelectric ceramic tuning axial model
图 8 压电陶瓷调谐轴向模型图

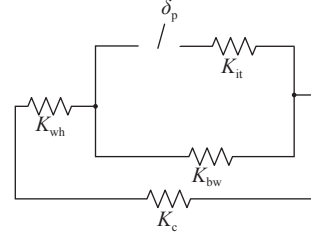


Fig. 9 Diagram of simplified piezoelectric ceramic tuning axial model
图 9 压电陶瓷调谐轴向简化模型图

通过对模型的分析可以得到系统的平衡方程为

$$\begin{cases} \delta_c = \delta_{it} + \delta_{wh} + \delta_p \\ \delta_{bw} + \delta_{it} + \delta_p = 0 \\ F_c = K_c \delta_c \\ F_{wh} = K_{wh} \delta_{wh} \\ F_{it} = K_{it} \delta_{it} \\ F_{bw} = K_{bw} \delta_{bw} \\ F_{wh} = -F_c \\ F_{wh} = F_{it} - F_{bw} \end{cases} \quad (13)$$

式中: δ_{it} 、 δ_p 分别为调谐器和调谐器连接环整体以及压电陶瓷的位移; F_{it} 表示调谐器和调谐器连接环整体所受到的力。

通过解以上方程可以得到系统任意部分与压电陶瓷位移 δ_p 的关系为

$$\begin{cases} \Delta = K_{it} K_{wh} + K_{bw} (K_c + K_{wh}) + K_c (K_{it} + K_{wh}) \\ F_{it} = -\frac{K_{it} [K_c K_{wh} + K_{bw} (K_c + K_{wh})]}{\Delta} \delta_p \\ F_{bw} = -\frac{K_{it} K_{bw} (K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_p \\ F_{wh} = -\frac{K_{it} K_c K_{wh}}{\Delta} \delta_p \\ F_c = \frac{K_{it} K_c K_{wh}}{\Delta} \delta_p \\ \delta_{it} = -\frac{K_c K_{wh} + K_b (K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_p \\ \delta_{bw} = -\frac{K_{it} (K_c + K_{wh})}{\Delta} \delta_p \\ \delta_{wh} = -\frac{K_{it} K_c}{\Delta} \delta_p \\ \delta_c = \frac{K_{it} K_{wh}}{\Delta} \delta_p \end{cases} \quad (14)$$

当压电陶瓷调谐器产生位移 $\delta_p = 1 \mu\text{m}$ 时, 超导腔各部分轴向受力和位移情况见表 5。

通过以上分析, 压电陶瓷调谐器在调谐过程中, 位移有 89.5% 传递给腔, 压电陶瓷调谐器的调谐效率为 89.5%。

表 5 压电陶瓷调谐器产生 1 μm 位移时各部件受力及位移状态表

parts	force/N	displacement/μm
tuner/interface rings	-2.02	-0.020
tuner bellow/end dishes	-0.03	-0.980
helium tank/front dishes	-1.99	-0.085
cavity	1.99	0.895

5 洛伦兹力失谐仿真分析

5.1 静态洛伦兹力失谐分析

超导腔内高频电磁场对腔壁产生的压力大小为

$$p = \frac{1}{4} (\mu_0 H^2 - \epsilon_0 E^2) \quad (15)$$

式中: H 和 E 分别为腔壁表面磁场和腔壁表面电场, 其大小与加速梯度 E_{acc} 呈正比。洛伦兹力会使得腔体产生微小量级的形变, 导致腔体频率发生偏移, 这种现象被称为超导腔洛伦兹力失谐^[14]。评价洛伦兹力失谐 频率偏移采用洛伦兹力失谐因子, 其表达式为

$$\Delta f = K_L E_{acc}^2 \quad (16)$$

式中: Δf 为频率偏移量; K_L 为洛伦兹力失谐因子。影响洛伦兹力失谐因子大小的主要因素为腔体刚度, 安装调谐器会使得“腔体-液氮槽-调谐器”整体刚度提升, 从而减小洛伦兹力失谐对腔体频率偏移的影响。

使用 COMSOL 多物理仿真软件对超导腔进行洛伦兹力失谐仿真: 首先使用电磁波、频域模块仿真腔内电磁场的本征频率模式, 得到腔体表面电场和表面磁场; 然后使用固体力学模块计算洛伦兹力对腔体表面产生的微小位移量; 最后使用电磁波、频域模块计算腔体形变后的本征频率。根据腔体形变前和形变后计算的本征频率得到由于洛伦兹力失谐产生的频率偏移量, 然后根据腔体轴向电场积分、有效加速长度和腔体渡越时间因子计算出加速梯度 E_{acc} , 代入式 (16) 计算得到洛伦兹力失谐因子 K_L 。表 6 列出添加调谐器前后洛伦兹力失谐因子以及最大频率偏移量。从表 6 中可以看出, 安装调谐器对超导腔洛伦兹力失谐影响很大。在最大运行梯度 14 MV/m 时, 安装调谐器后超导腔频率偏移量减小 84%。

表 6 安装调谐器前后洛伦兹力失谐参数表

Table 6 Lorentz force detuning parameters before and after installing the tuner

state	LFD factor/ (Hz·m ² ·MV ⁻²)	maximum detuning/Hz
without tuner	9.32	1827
with tuner	1.48	290

5.2 动态洛伦兹力失谐分析

散裂二期超导腔在脉冲模式下运行, 由于受到前馈功率脉冲 P_f 的激励, 导致超导腔产生动态失谐^[15]。根据脉冲响应公式对加速度梯度进行推导得到

$$E_{acc} = \begin{cases} E_1 (1 - e^{-t/\tau_{inj}}), & 0 \leq t \leq t_{inj} \\ E_0, & t_{inj} \leq t \leq t_{off} \\ E_0 e^{-(t-t_{off})/\tau_{cav}}, & t_{off} \leq t \end{cases} \quad (17)$$

如图 10 所示, 当 $0 \leq t \leq t_{inj}$ 时, 其中加速梯度的脉冲上升沿时间为 $t_{inj} = \ln 2 \frac{2Q_L}{\omega_0} \approx 330 \mu s$, 腔体通过反馈控制系统使腔体的加速场以时间常数 τ_{cav} 指数上升; 当 $t_{inj} \leq t \leq t_{off}$ 时, 腔体处于平顶时间 $t_{ft} = t_{off} - t_{inj} \approx 600 \mu s$; 当 $t_{off} \leq t$ 时, 腔体处于下降沿状态, 加速梯度以腔体时间常数 τ_{cav} 指数下降。

因此, 腔体因电磁场所受到的洛伦兹力随时间的变化函数为

$$p(x, y, z, t) = \begin{cases} p_1(x, y, z) (1 - e^{-t/\tau_{inj}})^2, & 0 \leq t \leq t_{inj} \\ p_0(x, y, z), & t_{inj} \leq t \leq t_{off} \\ p_0(x, y, z) e^{-2(t-t_{off})/\tau_{cav}}, & t_{off} \leq t \end{cases} \quad (18)$$

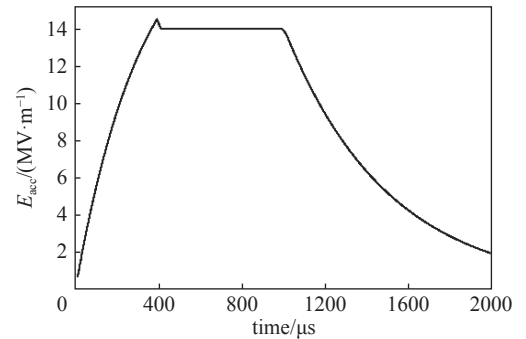


Fig. 10 Variation of acceleration gradient with time during the pulse

图 10 脉冲期间加速梯度随时间变化图

那么,腔体频率的偏移也是随时间变化的,引入腔体机械时间常数 τ_m ,可以得到腔体频率偏移量随时间的一阶微分方程为(忽略高次项)^[16]

$$\dot{\Delta f}(t) = -\frac{1}{\tau_m} [\Delta f(t) - \Delta f_0] - \frac{1}{\tau_m} K_L E_{acc}^2(t) \quad (19)$$

式中: $\dot{\Delta f}(t)$ 为频率偏移随时间的一阶微分项; Δf_0 为初始时刻频率偏移量。从而可以得到超导腔动态洛伦兹力失谐量随时间的变化如图 11 所示。从图中可以看出,在超导腔处于上升沿期间,动态洛伦兹力随加速梯度的上升而快速上升;到达平顶时间后由于腔体动力学因素影响还有小幅度缓慢上升的趋势,失谐量逐渐稳定;脉冲结束后失谐量快速下降,然后随时间慢慢趋近于 0。通过对动态洛伦兹力失谐的分析,有利于后续对频率控制系统中压电陶瓷频控环的控制算法进行设计,从而达到补偿动态洛伦兹力失谐的目的。

采用 COMSOL 多物理场仿真软件对 648 MHz 6-cell 椭球腔先进行电磁仿真,计算出稳态的腔壁表面电场和表面磁场,然后定义动态脉冲响应,结合洛伦兹力的大小和时间变量,用固体力学模块计算超导腔的瞬态响应,如图 12 所示,图中绘制的是超导腔在脉冲过程中腔体的位移变化量。可以看出,超导腔在脉冲上升沿期间,腔体形变比较缓慢;平顶期间,腔体形变趋势较大,该趋势持续到平顶时间结束后一段时间,然后超导腔开始恢复。由于存在机械阻尼,超导腔恢复 90%左右后腔壁出现小幅度简谐运动。

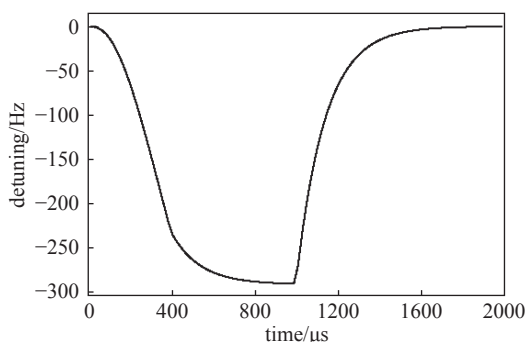


Fig. 11 Dynamic Lorentz force detuning during the pulse

图 11 脉冲期间超导腔动态洛伦兹失谐

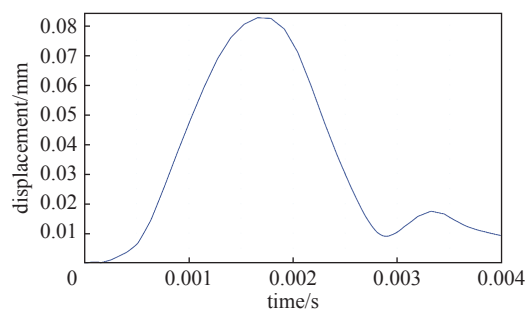


Fig. 12 Superconducting cavity response during pulses (0~4 ms)

图 12 脉冲期间超导腔响应 (0~4 ms)

6 调谐器测试

搭建了调谐器测试平台,将加工后的调谐器样机与 650 MHz 单 cell 腔上进行组装,并在常温下进行了部分性能参数的测量。如图 13 所示,在调谐器的调谐臂以及调谐器上下连接环上安装千分表进行位移测量,通过转动步进电机,得到步进电机转动步数和超导腔频率以及调谐臂、调谐器连接环位移关系如图 14 所示。

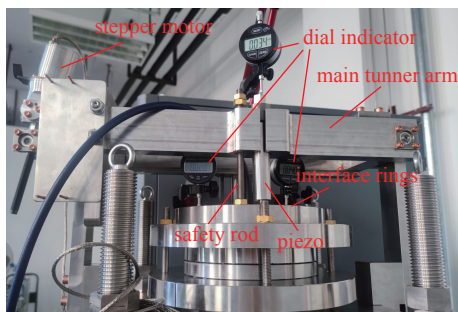


Fig. 13 Photo of tuner mounted test on 650 MHz single cell cavity

图 13 调谐器测试图

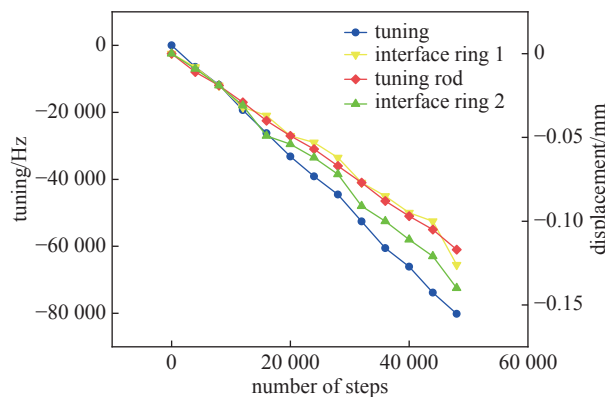


Fig. 14 Plot of tuner stepper motor steps versus superconducting cavity frequency variation and tuner displacement variation

图 14 步进电机转动步数与超导腔频率变化与调谐器位移变化图

通过线性拟合步进电机的转动步数与调谐频率变化,得到机械调谐器的调频分辨率为 1.68 Hz/step(通过对步进电机驱动器步距角的细分,可以进一步提高分辨率)。同时,调谐臂上的位移为 2.41 nm,调谐器上连接环的位移为 2.43 nm,调谐器下连接环的位移为 2.85 nm。机械调谐器的行程范围 > 0.6 mm(调谐器单独测试行程 > 3 mm),对

应散裂二期 648 MHz 6-cell 椭球腔的频率变化范围为 102.6 kHz, 满足设计指标要求。

7 结 论

本文阐述了中国散裂中子源二期升级方案中 648 MHz 6-cell 超导腔调谐器的设计, 分析了调谐器的设计需求、结构原理、调谐器的性能, 对超导腔运行时的动态洛伦兹力引起的频率偏移进行了重点分析, 进行调谐器优化, 使之满足超导腔脉冲模式运行需求, 长期稳定地工作, 便于安装及维护, 搭建了调谐器的常温测试平台, 并对调谐器样机的部分参数进行了测试, 为批量化的生产应用打下基础。接下来还会进行调谐器的低温性能测试, 并进行与散裂二期 648 MHz 6-cell 椭球腔的集成测试。

致 谢 感谢高频组和项目团队各位老师给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 周文中, 潘卫民, 葛锐, 等. 中国散裂中子源二期双 spoke 超导腔设计[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 034004. (Zhou Wenzhong, Pan Weimin, Ge Rui, et al. Design of the China Spallation Neutron Source phase II double spoke resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 034004)
- [2] Delaven J R. Ponderomotive instabilities and microphonics—a tutorial[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2006, 441(1/2): 1-6.
- [3] 倪柏初, 戴建枰, 张娟, 等. Spoke012 超导腔低温调谐器的研制[J]. *核电子学与探测技术*, 2015, 35(4): 403-407. (Ni Baichu, Dai Jianping, Zhang Juan, et al. Development of a cryogenic tuner for the Spoke012 superconducting cavity[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2015, 35(4): 403-407)
- [4] Mitchell R, Matsumoto K, Ciovati G, et al. Lorentz force detuning analysis of the Spallation Neutron Source (SNS) accelerating cavities[R]. Los Alamos: Thomas Jefferson National Accelerator Facility, 2001.
- [5] Rathore M, Jain V K, Atulkar A, et al. Study of Lorentz force detuning and its compensation in superconducting radiofrequency cavity: a review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 1369-1374.
- [6] Schmidt C, Branlard J, Bousonville M, et al. Operational experience with the European XFEL SRF linac[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity. 2023.
- [7] Kern R S, Svanberg C, Fransson K, et al. Completion of testing series double-spoke cavity cryomodules for ESS[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity. 2023.
- [8] Pischalnikov Y, Contreras-Martinez C. Review of the application piezoelectric actuators for SRF cavity tuners[C]//Proceedings of the 23rd International Conference & Exhibition. 2023.
- [9] Belomestnykh S, Posen S, Bafia D, et al. Key directions for research and development of superconducting radio frequency cavities[DB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2204.01178, 2022.
- [10] Borissov E, Gonin I, Khabiboulline T, et al. Design of a compact lever slow/fast tuner for 650 MHz cavities for project X[C]//Proceedings of LINAC2014. 2014: 957-959.
- [11] Contreras-Martinez C. Electromagnetic and mechanical properties of medium β SRF elliptical cavities[D]. East Lansing: Michigan State University, 2021.
- [12] 米正辉. 超导腔调谐器设计研究[D]. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2015. (Mi Zhenghui. Design and research of tuner for superconducting cavity[D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015)
- [13] Pagani C, Bosotti A, Michelato P, et al. Report on fast piezo blade tuner (UMI tuner) for SCRF resonators design and fabrication[R]. CARE-Note-05-021-SRF, 2005.
- [14] Cano-Pleite E, Amorim A, Swieszek J S, et al. Numerical evaluation of the tuning, pressure sensitivity and Lorentz force detuning of RF superconducting crab cavities[C]//Excerpt from the Proceedings of the 2018 COMSOL Conference in Lausanne. 2018.
- [15] Ayvazyan V, Simrock S N. Dynamic Lorentz force detuning studies in TESLA cavities[C]//Proceedings of the EPAC 2004. 2004.
- [16] Gassot H M. Etudes de la stabilité mécanique des cavités supraconductrices et de la méthode de rigidification par projection thermique de cuivre[R]. IPNO-T-2002-01, 2001.