引用格式：李阿红, 刘华昌, 蒙林, 等. 等效电路算法在 CSNS-II 椭球超导腔预调谐中的应用研究 [J]. 电子科技大学学报, 2026, 55(3): 333-338.
LI A H, LIU H C, MENG L, et al. Application of equivalent circuit algorithm in pre-tuning of CSNS-II ellipsoidal superconducting cavities[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2026, 55(3): 333-338.

等效电路算法在 CSNS-II 椭球超导腔预调谐中的应用研究

李阿红[1, 2, 3*]，刘华昌[2, 3]，蒙　林[1]，王　生[2, 3]

（1. 电子科技大学电子科学与工程学院，成都 611731；2. 散裂中子源科学中心，东莞 523803；3. 中国科学院高能物理研究所，北京 100049）

摘要：提出了一种基于等效电路模型的快速预调谐方法，可应用于 CSNS-II 工程中的多单元椭球超导腔上。通过分析椭球超导腔的电磁特性，建立了等效电路模型，将电磁问题简化为电感、电容及耦合电容的电路问题，推导了电场平坦度调谐过程中各单元频率调谐量的计算方法。通过仿真分析表明，该算法使腔体电场平坦度由 77% 提高到 98% 以上。基于该算法，设计了一套集成高频参数测量与机械调谐的预调谐系统。使用铜材椭球样腔进行实验，经过多次迭代调谐后，电场平坦度达到 96.5%，满足 CSNS-II 超导腔预调谐性能要求。该研究为多单元超导腔的高精度预调谐提供了理论与工程上的参考解决方案，对提升粒子加速器性能具有重要应用价值。

关键词：超导腔；预调谐；等效电路模型；调谐算法
中图分类号：TL53　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12178/1001-0548.2024307

Application of equivalent circuit algorithm in pre-tuning of CSNS-II ellipsoidal superconducting cavities

LI Ahong[1, 2, 3*], LIU Huachang[2, 3], MENG Lin[1], and WANG Sheng[2, 3]

(1. School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China; 3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: A rapid pre-tuning method based on an equivalent circuit model is proposed for multi-cell elliptical superconducting cavities in the CSNS-II project. Through electromagnetic analysis of elliptical superconducting cavities, an equivalent circuit model was established by decomposing the electromagnetic problem into circuit problem including inductance, intrinsic capacitance, and inter-cell coupling capacitance. A computational method was derived for quantifying frequency tuning requirements during electric field flatness optimization. Simulation results indicate that the cavity's electric field flatness has been improved from 77% to over 98% after tuning. Based on this method, a pre-tuning system integrating high-frequency parameter measurement and mechanical tuning was designed. The experiment was conducted using a copper elliptical prototype cavity. After multiple iterations of tuning, the flatness of the electric field reached 96.5%, meeting the pre-tuning specifications of the CSNS-II superconducting cavity. This study provides a theoretical and engineering solution for high-precision pre-tuning of multi-cell superconducting cavities, showing significant application value for enhancing the performance of particle accelerators.

Key words: superconducting cavity; pre-tuning; equivalent circuit model; tuning algorithm

超导射频腔技术在现代高能粒子加速器、自由电子激光及质子治疗设备等领域中发挥重要作用。超导腔通常采用纯铌材料，2 K 低温下其高导电性可以显著降低电阻损耗。在射频场作用下，腔体的品质因数（Q 值）可以达到 10^{10} 数量级，能够大幅降低功率损耗，并可提供 20～30 MV/m 的高加速梯度，使加速器更紧凑，建设成本也大幅降低。

椭球超导腔由椭球形单元组合而成，其独特的

收稿日期：2024−11−08
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金（2020A1515110579）
作者简介：李阿红，博士生，高级工程师，主要从事加速器技术方面的研究。
*通信作者 E-mail: liah@ihep.ac.cn

结构能够减小多个电场峰值，抑制电场放电，提高电场均匀性和加速梯度[1]。然而，制造过程中的形变、加工误差和材料不均匀性，会导致腔体频率偏移和电场分布不均匀，降低粒子束质量，进而影响加速性能[2]。因此，研制过程中预调谐步骤至关重要：需通过物理方法调整腔体几何形状，使各单元腔电场平坦分布，确保最优加速效果。

等效电路方法可有效简化超导腔的预调谐问题，将电磁行为转化为电感、电容和耦合电容模型，通过电路分析来预测和优化腔体的谐振频率和电场分布。在 20 世纪 80 年代初，文献 [3] 提出的等效电路模型，借助频率补偿的方法来优化电场平坦度，并通过手动迭代提升多单元腔的加速性能。文献 [4] 利用这一算法完成 TRISTAN 的 32 个超导腔的预调谐，电场平坦度与理论误差为 1.4%。文献 [2] 通过模式频率测量和扰动分析实现更高的电场平坦度。文献 [5-6] 基于调谐后特征矩阵优化迭代轮次，但该方法需要测量更多模式，且难以将平坦度提升至 96% 以上。尽管上述方法已有成功应用，但在多单元腔复杂耦合效应及非线性电磁参数变化影响下，调谐仍面临挑战。因此，精确建立模型分析腔体的电磁特性，优化腔体单元间耦合效应，通过等效电路算法简化测量和实现高效调谐，仍是亟待解决的问题。

中国散裂中子源二期工程（CSNS-II）计划将束流功率提高到 500 kW，并在直线加速段中加入 648 MHz 的 6 单元椭球超导腔，将束流能量从 80 MeV 加速至 300 MeV。然而，椭球腔的精密加工误差导致单元间频率失谐与电场畸变，直接影响束流品质。实验表明，当 648 MHz 椭球腔的单元长度偏差 0.5 mm 时，轴线电场平坦度会由 98.2% 降低到 70%；同轴度偏量 1 mm 时，电场平坦度降低到 96.3%；单元倾斜 1 mm 时，电场平坦度低于 95%[7]。因此，超导腔的预调谐对整个加速过程的束流品质至关重要，有助于降低束流的横向发射度，提高束流的能量稳定性和均匀性[8]。

本文以 CSNS-II 所需的 648 MHz 椭球超导腔为研究对象，基于等效电路算法，简化计算公式和优化计算过程中的相关参数，探索简单易用的调谐方法，并通过模拟和实验来验证其可行性和有效性。通过研究不同条件下腔体单元的拉压调谐，为多单元椭球超导腔的预调谐提供了可行的方案，以确保腔体工作在高加速梯度和高品质因数的状态，为 CSNS-II 的升级提供了工程经验和实现基础。

1 椭球超导腔的等效电路算法

超导腔的电磁场分布是分析和设计超导加速器的核心。精确求解麦克斯韦方程可获得腔内的电场和磁场分布，为调谐、优化及性能评估提供理论基础[9]。超导腔的电磁场特性主要由腔体的形状、尺寸和材料决定，不同模态（如 TM 模态和 TE 模态）有不同的电磁分布特征。

在实际应用中，最常用的工作模态为 TM010 模态。其轴向电场最强，磁场环绕腔体分布，有利于产生均匀且强大的纵向电场，非常适合用于粒子加速。对于多单元的超导腔，如本文所讨论的 CSNS-II 的 6 单元椭球超导腔，采用 TM010-π模态，让相邻单元腔电场方向相反，有助于稳定束流加速。

腔体的谐振频率由几何结构、材料和工作模态决定。椭球形腔体的谐振频率可通过本征模求解获得。品质因数（Q 值）和电场平坦度直接影响加速性能。而单元间的电磁耦合也是一个重要的设计和调谐考虑因素，腔间耦合效应也影响整腔电场分布。

等效电路模型可用于多单元超导腔分析。对于无限长的超导腔，若电磁模式为 TM010 模，则其等效电路模型可如图 1 所示。

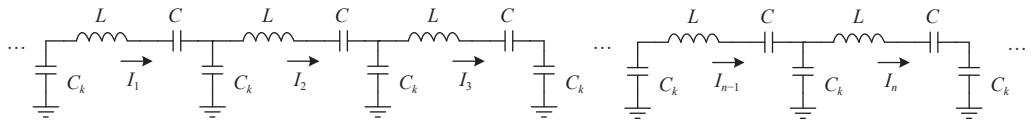


图 1 无限长椭球超导腔的等效电路

每个单元的电磁特性可以用 LC 串联电路来模拟，单元间耦合则通过耦合电容来表征，耦合电容决定了相邻单元之间的能量交换，从而影响腔体的整体电磁特性。这样，对于第 m 腔的等效电路，可以利用基尔霍夫定律，建立如下的关系式：

$$\left(\mathrm{j}\omega_0 L_m + \frac{1}{\mathrm{j}\omega_0}\left(\frac{1}{C_m}+\frac{2}{C_k}\right)\right) i_m = \frac{1}{\mathrm{j}\omega_0 C_k}(i_{m-1}+i_{m+1}) \quad (1)$$

由于电流的分布为行波形式，若ϕ是相邻腔体间的相位差，根据欧拉公式，可求得：

$$\omega_\phi^2 = \frac{1}{L_m C_m} + \frac{2}{L_m C_k}(1-\cos\phi) \quad (2)$$

由于腔体工作在 π 模，当$\phi=\pi$时，可以用ω_0近似代替ω_π。若令 k 是相对带宽的一半，k_m是第 m 个腔的 k 值，则有：

$$\frac{\omega_\pi^2-\omega_0^2}{(\omega_\pi+\omega_0)^2}\approx\frac{\omega_\pi^2-\omega_0^2}{4\omega_0^2}=\frac{C_m}{C_k}=k_m \tag{3}$$

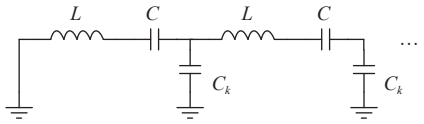
此外，令：

$$\frac{1}{C_m}+\frac{2}{C_k}=\frac{1}{C'_m},\quad \omega_m^2=\frac{1}{LC'_m} \tag{4}$$

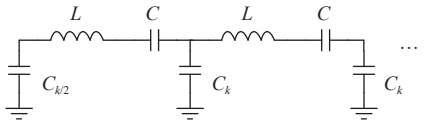
当单元腔之间是弱耦合关系时，$C'_m\approx C_m$，则可以将式 (1) 化简为：

$$\left(1-(\omega_0/\omega_m)^2\right)i_m-k_m(i_{m-1}+i_{m+1})=0 \tag{5}$$

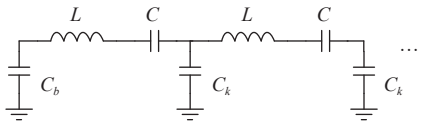
式 (5) 即为中间腔的电流与频率之间的表达形式。接下来讨论边缘单元腔的情况。受边界条件影响，边缘单元腔的耦合电容与其他腔的C_k存在差异：当末端腔体通过金属板封闭，电场在末端垂直于金属板，形成 Dirichlet 边界条件，使末端耦合电容C_k短路，称为电边界；当末端腔体通过长束流管或对称耦合时，磁场在末端平行于边界，形成 Neumann 边界条件，此时末端的耦合电容分裂成$C_k/2$，称为磁边界。而实际超导腔末端既非完全短路封闭，也未采用长束流管连接，其边界条件介于电边界和磁边界之间。本文假定末端的耦合电容为C_b，如图 2 所示。



a. 当腔体末端用金属板封闭时，为电边界



b. 当腔体末端用长束流管连接时，为磁边界



c. 通常情况下，介于电边界与磁边界之间

图 2　对于边缘单元腔的等效电路讨论

对于前端有：

$$\left(\mathrm{j}\omega_0L_1+\frac{1}{\mathrm{j}\omega_0}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_k}+\frac{1}{C_b}\right)\right)i_1=\frac{1}{\mathrm{j}\omega_0C_k}i_2 \tag{6}$$

对于末端有：

$$\left(\mathrm{j}\omega_0L_N+\frac{1}{\mathrm{j}\omega_0}\left(\frac{1}{C_N}+\frac{1}{C_k}+\frac{1}{C_b}\right)\right)i_N=\frac{1}{\mathrm{j}\omega_0C_k}i_{\mathrm{N-1}} \tag{7}$$

同样的，令：

$$\frac{1}{C}+\frac{1}{C_k}+\frac{1}{C_b}=\frac{1}{C'} \tag{8}$$

虽然C_b与C_k不同，但对于弱耦合关系，依然为$C'\approx C$，则：

$$\left(1-(\omega_0/\omega_1)^2\right)i_1-k_1i_2=0 \tag{9}$$

$$\left(1-(\omega_0/\omega_N)^2\right)i_N-k_Ni_{N-1}=0 \tag{10}$$

由于单元腔的结构一致，则所有腔体的电容C_m近似相等，即：

$$k_m\approx k=\frac{C_0}{C_k} \tag{11}$$

汇总边缘单元腔与中间腔的公式，可得：

$$\begin{cases}\left(1-(\omega_0/\omega_1)^2\right)i_1-ki_2=0\\ -ki_{m-1}+\left(1-(\omega_0/\omega_m)^2\right)i_m-ki_{m+1}=0\\ -ki_{N-1}+\left(1-(\omega_0/\omega_N)^2\right)i_N=0\end{cases} \tag{12}$$

利用式 (12) 即可求得每个单元腔的谐振频率，从而指导对腔体的调谐。针对 CSNS-II 的 6 单元椭球超导腔，式 (12) 对应的具体形式为：

$$\begin{cases}\omega_1/\omega_0=1/\sqrt{1+ki_2/i_1}\\ \omega_2/\omega_0=1/\sqrt{1+k(i_1+i_3)/i_2}\\ \omega_3/\omega_0=1/\sqrt{1+k(i_2+i_4)/i_3}\\ \omega_4/\omega_0=1/\sqrt{1+k(i_3+i_5)/i_4}\\ \omega_5/\omega_0=1/\sqrt{1+k(i_4+i_6)/i_5}\\ \omega_6/\omega_0=1/\sqrt{1+ki_5/i_6}\end{cases} \tag{13}$$

在式 (13) 中，主要的参数包括 k 和电流之间的比例关系。虽然不方便直接对电流进行测量，但可以通过测量电场分布得到电流的比例关系，从而求出各个单元腔的实际谐振频率。

对于电场平坦度理想的π模椭球腔，相邻两个单元腔的电流幅度相同，方向相反，即：

$$i_1=-i_2=i_3=\cdots=(-1)^{m-1}i_m \tag{14}$$

将式 (14) 代入式 (13) 可得：

$$\begin{cases}\omega_1/\omega_0=1/\sqrt{1+k}\\ \omega_2/\omega_0=1/\sqrt{1+2k}\\ \omega_3/\omega_0=1/\sqrt{1+2k}\\ \omega_4/\omega_0=1/\sqrt{1+2k}\\ \omega_5/\omega_0=1/\sqrt{1+2k}\\ \omega_6/\omega_0=1/\sqrt{1+k}\end{cases} \tag{15}$$

在式 (13) 和式 (15) 中，关键参数 k 是从等效电容来近似获得的，并不能直接测量，因此需要推导出其可测量的公式形式。

根据式 (2) 及式 (3)，可得：

$$\omega_\phi^2 = \omega_0^2 + 2k\omega_0^2(1-\cos\phi) \tag{16}$$

当谐振腔工作在第 m 个模态时，有：

$$\left(\frac{f^{(m)}}{f_0}\right)^2 = 1 + 2k\left[1-\cos\left(\frac{m\pi}{N}\right)\right] \tag{17}$$

假设测量了第 m 个模式和第 p 个模式的频率，当选择 $m=1$（最低模式）和 $p=N$（π 模式）时，代入并联立公式化简后可得：

$$k = \frac{\frac{1}{2}\left[\left(f^{(N)}\right)^2 - \left(f^{(1)}\right)^2\right]}{2\left(f^{(1)}\right)^2 - \left(f^{(N)}\right)^2\left[1-\cos(\pi/N)\right]} \tag{18}$$

利用式 (18) 即可求得 k 值。

由此，在 CSNS-II 的椭球腔预调谐中，可根据测得的轴向电场分布的比例及第 1 个谐振模式和 π 模式的谐振频率，通过式 (18) 计算耦合系数 k。代入到式 (13) 和式 (15) 中，可分别求得各单元的实测谐振频率和理论值，其差值即为每个单元的频率调整量。结合腔体长度和频率的对应关系确定长度调谐量，通过拉压装置微调单元腔长度，实时监测频率、位移和场分布的变化，经过数次迭代，就能够使轴向电场分布和谐振频率达到目标要求。

2 预调谐装置及其工作原理

应用等效电路算法对椭球超导腔进行预调谐，还需要相应的测量和调试平台支持，本文为此设计了预调谐装置。其目标是精确调整腔体几何形状，使各单元腔谐振频率一致，实现电场的平坦分布，确保腔体在高加速梯度下的稳定运行。整个 648 MHz 椭球腔预调谐装置主要包括高频参数测试装置、拉压调谐装置及数据采集和控制系统 3 部分。

图 3 展示了预调谐装置，左侧为测量区，右侧为调谐区。椭球超导腔可沿导轨自由移动，实现快速测量和调谐。在测量区内布置高频参数测量装置，包括网络分析仪、步进电机、小球拉线系统及控制系统。小球拉线系统沿椭球腔中心轴线运动。线的两端由绕线轮和重物绷紧，线上金属小球沿轴线运动来扰动腔内的电场分布，通过网络分析仪来测量相位扰动，并利用 Slater 微扰理论，根据小球位置处电磁场的相位变化来推出该位置的电场强度，从而绘制出整个腔体的轴向电场分布[10]。

小球在谐振腔内运动时对各点产生的微扰与该处的电场 E 与磁场 H 相关。超导腔的中心轴线上磁场忽略不计，根据谐振腔的相频响应关系，实际测试小球引起的相位变化根据式 (19)～式 (22) 计算出轴向电场平坦度 Flatness：

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{3\Delta V}{4U}\left(\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{\mu_r-1}{\mu_r+2}\mu_0 H^2\right) \tag{19}$$

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{\pi r^3}{U}\varepsilon E^2 \tag{20}$$

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{\tan(\Delta\phi)}{2Q_L} \tag{21}$$

$$\text{Flatness} = \left[1 - \frac{E_{\max}-E_{\min}}{\frac{1}{N}\sum E_i}\right] \tag{22}$$

小球的位置由步进电机精确控制，并通过网络分析仪同步测量相位扰动。图 3 中的预调谐装置的右端设置有调谐区，核心组件包括精密步进电机、夹具、拉压板及位移传感器。电机驱动夹具对腔体单元进行微量拉伸或压缩，调整谐振频率和优化轴向场分布，位移传感器实时监测形变量，以确保调谐效果符合预期。然而，由于材料弹性回弹，实际形变量与理论值存在误差，因此需通过多次迭代测量和调谐，逐步消除频率和电场的误差。

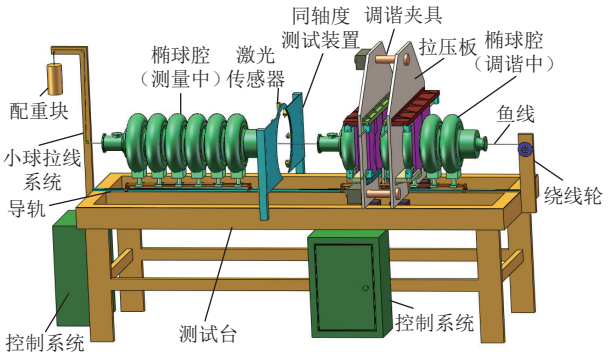


图 3 预调谐装置

测量区与调谐区之间布置探测圆环，环上安装若干激光位移传感器，测量椭球腔的同轴度。综合电场平坦度、谐振频率和同轴度数据，控制软件计算调谐参数，指导拉压调谐装置调整椭球腔结构。

数据采集与控制系统确保调谐自动化与高精度。计算机与数据采集模块实时采集谐振频率和电场数据，并通过反馈控制模块计算每个单元的调谐量，迭代调整操作参数，直到各单元的频率和电场平坦度达到预定目标值。可引入自适应控制算法，动态调整控制参数，快速收敛至目标状态。完成高频参数测量后，利用等效电路法计算调谐量，用拉压调谐装置调整各单元腔结构。调谐后在调谐区复测谐振频率和电场平坦度，若满足目标值则结束调谐，否则继续迭代，直至满足性能要求。

3　模拟仿真

为验证等效电路算法在 CSNS-II 椭球超导腔预调谐中的有效性，进行仿真模拟分析。首先，在三维仿真中建立 CSNS-II 中所用的 6 单元椭球超导腔模型，包括椭球腔的单元半径、长度和加强筋等细节[11]。从未调谐状态开始，测量腔体的初始频率分布和轴向电场平坦度，以评估各单元间的频率差异。图 4 展示了仿真模型，人为对每个单元腔施加不同的形变，来模拟加工和焊接中的误差。

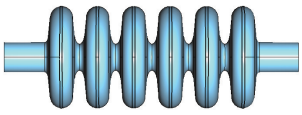


图 4　6 单元椭球超导腔仿真模型

随后，利用等效电路算法计算调谐量，调整单元腔的拉伸或压缩量，优化谐振频率，通过仿真软件模拟调谐前后的电场分布情况。为验证算法的有效性，分别采用 2 组不同初始值进行仿真，如图 5 所示。其中，第 1 次仿真时初始电场平坦度为 77.12%，调谐后达到 98.49%；第 2 次仿真时初始电场平坦度为 52.86%，调谐后为 97.89%。2 次调谐均可满足 95% 的目标值。仿真实验虽验证了算法的可行性，但在实际调谐中，由于材料回弹问题，调谐量无法完全匹配理论计算值，仍需多次迭代优化。

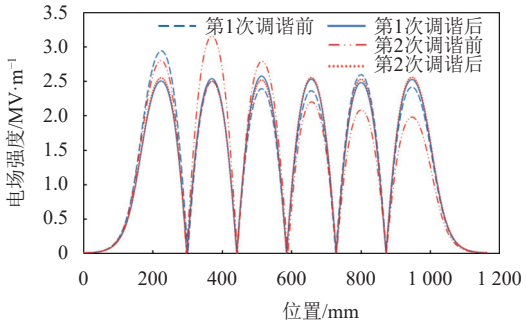


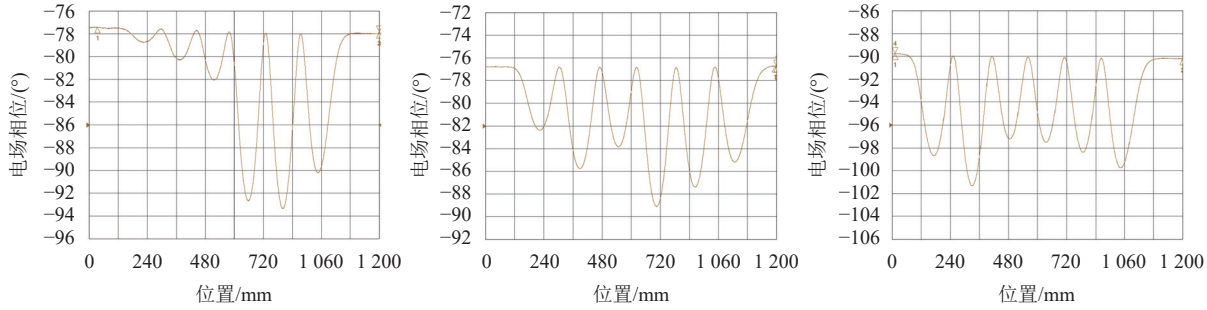
图 5　预调谐前后椭球腔的电场分布仿真情况

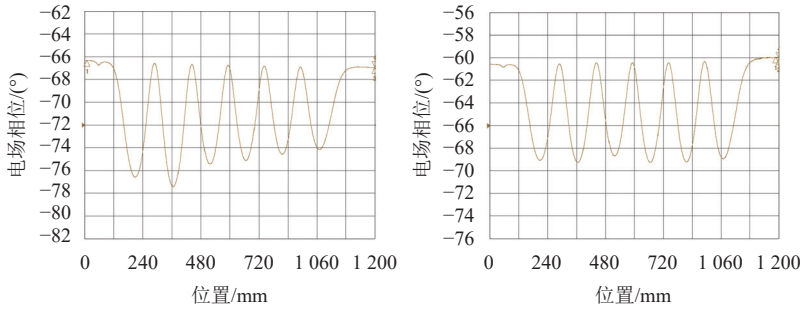
4　实验验证

对等效电路算法在椭球腔上的应用进行调谐实验验证。待测腔为符合 CSNS-II 需求设计的 6 单元椭球铜材样腔。根据初始测量数据，控制系统依次对各单元腔实施拉伸或压缩，并通过位移传感器测量形变量。每次调谐后，使用网络分析仪测量腔体，记录谐振频率的变化和轴向电场的平坦度。由于仿真无法模拟材料回弹，在实验阶段需要重点关注其影响，考虑采用多次迭代调谐的策略[12]。

CSNS-II 的 6 单元椭球腔铜材样腔加工焊接后，初始电场平坦度仅为 2%，如图 6a 所示。需要将谐振频率调至 648 MHz，电场平坦度提升至 95%。基于等效电路算法计算调谐量，实验发现每次拉压操作的腔体形变与理论值存在偏差。通过对频率和形变量的反复测量和修正，系统逐步逼近目标。位移传感器和网络分析仪测得数据实时传输到控制系统，根据偏差调整调谐量，确保了频率和电场的稳定性和精度。

实验过程中阶段性的调谐结果如图 6b～图 6e 所示：初始阶段优化第 1、3、4、5 单元腔（图 6b），后续调整第 2、3、4 单元腔（图 6c），再持续优化第 2、3 单元腔（图 6d），此后微调至最终目标状态（图 6e）。经过多轮调谐，最终超导腔内的电场平坦度为 96.5%，达到了预期目标。预调谐完成后的轴向场分布如图 7 所示。实验结果表明，基于等效电路的调谐方法精度高、效率快，可针对各单元进行精确调整，而非依赖整腔调谐。通过对每个单元的逐步迭代调节，腔体性能可迅速改善。此外，预调谐后的腔体在高频测试中展现了良好的频率一致性和电场平坦度，实验结果与三维仿真结果具有良好的一致性，进一步验证了调谐算法的准确性和本文模型的有效性。





d. 第3阶段场分布　　e. 最终场分布

图 6　椭球腔预调谐过程中场分布测量情况

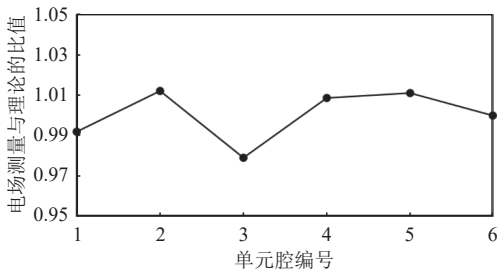


图 7　预调谐后的轴向场分布

5　结束语

本文针对 CSNS-II 工程中的 6 单元椭球超导腔，基于等效电路算法，给出了测量、计算和调谐的预调谐方法，旨在解决腔体谐振频率偏差和电场分布不均的问题。本文首先给出等效电路算法的计算方程，并通过仿真模型验证算法有效性。通过预调谐装置的实验验证，该方法可准确计算椭球腔的预调谐量，提升调谐效率，为预调谐工作的开展提供了理论基础和技术支撑。由于材料回弹影响，需多次迭代调谐来弥补误差。最终，椭球腔电场平坦度从 2.0% 提高至 96.5%，显著改善了椭球腔的电磁性能，为其在 CSNS-II 中的应用提供了技术保障。

实验不仅证明了调谐算法的准确性，也验证了预调谐系统的有效性，但材料回弹导致多次迭代，影响调谐效率。未来研究可引入修正项优化算法，减少迭代次数，压缩总调谐时间。还可探索提升调谐精度、扩展调谐方法适用范围及提高腔体运行稳定性，以进一步支持高能加速器的发展。

参 考 文 献

[1] GENG R L. Review of new shapes for higher gradients[J]. Physica C: Superconductivity, 2006, 441(1-2): 145-150.
[2] PADAMSEE H, KNOBLOCH J, HAYS T. RF superconductivity for accelerators[M]. NewYork: A Wiely-Interscience Publication, 1998.
[3] FERNANDES P, PARODI R. On compensation of axial electric field unflatness in multicell accelerating structures[J]. Particle Accelerators, 1984, 14: 185-199.
[4] TAJIMA T, FURUYA T, SUZUKI T, et al. Pre-tuning of TRISTAN superconducting RF cavities[C]//Proceedings of the Fourth Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 1989: 821-847.
[5] SEKUTOWICZ J, CHEN Y H, WEI Y X. A different tuning method for accelerating cavities[C]//Proceedings of the 4th Workshop on RF Superconductivity. Tsukuba: KEK, 1989: 849-857.
[6] 朱航, 翟纪元, 戴建枰. 9-cell 超导腔快速预调谐方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(10): 104015.
ZHU H, ZHAI J Y, DAI J P. Research on fast pre-tuning method of 9-cell superconducting cavities[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(10): 104015.
[7] 李波, 刘华昌, 王云, 等. CSNS-II 超导椭球腔形变电场平坦度仿真分析[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(3): 034001.
LI B, LIU H C, WANG Y, et al. Simulating analysis on electric field flatness of deformed superconducting elliptical cavity for CSNS-II linac[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(3): 034001.
[8] 李波, 刘华昌, 王云, 等. CSNS-II 超导椭球腔的高频设计和二次电子倍增研究[J]. 核技术, 2019, 42(8): 080201.
LI B, LIU H C, WANG Y, et al. Radio frequency design and multipacting study of superconducting elliptical cavity for CSNS-II linac[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(8): 080201.
[9] 傅君眉, 冯恩信. 高等电磁理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
FU J M, FENG E X. Advanced electromagnetic theory[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2000.
[10] TANG Z B, MA Z Y, HOU H T, et al. Frequency control and pre-tuning of a large aperture 500 MHz 5-cell superconducting RF cavity[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, 25: 030102.
[11] 李波, 刘华昌, 王云, 等. CSNS-II 超导椭球腔频率控制仿真研究[J]. 核科学与技术, 2020, 8(3): 130-136.
LI B, LIU H C, WANG Y, et al. Simulation analysis on frequency control of superconducting elliptical cavity for CSNS-II linac[J]. Nuclear Science and Technology, 2020, 8(3): 130-136.
[12] 郭志达, 李中泉, 翟纪元, 等. 1.3 GH 9 单元 Ichiro 型模型铜腔的预调谐[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 175-178.
GUO Z D, LI Z Q, ZHAI J Y, et al. Pretuning of 1.3 GHz 9-cell Ichiro copper cavity[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 175-178.

责任编辑　刘飞阳