

700MHz 单 cell 超导腔洛伦兹力失谐分析

葛明骐¹⁾ 赵升初²⁾

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 着重论述了超导腔的洛伦兹力失谐,并对 704MHz/ $\beta=0.45$ 单 cell 纯铌超导腔进行了静态洛伦兹力失谐分析和动态洛伦兹力失谐分析,对增加其机械稳定性的方式方法进行了讨论和计算,给出了其相应的加固方案.

关键词 超导腔 洛伦兹力 失谐 加固

1 引言

超导腔由于其高加速梯度、低损耗,近十年来,已被广泛地应用于加速器领域.然而在超导腔的运行和测量过程中,腔体会受到洛伦兹力的作用而产生形变,致使超导腔谐振频率发生偏移,这就是超导腔的洛伦兹力失谐.运行在 CW 模式下的超导腔,在运行过程中,失谐量不随时间变化,称为超导腔静态洛伦兹力失谐,而运行在脉冲模式下的超导腔,失谐量随时间而变化,则称为超导腔动态洛伦兹力失谐.

如果失谐量过大,接近其带宽(由 Q_L 决定)则会造成: RF 功率馈送系统的效率显著下降^[1],而且还会导致束流的能散增大^[2].在运行过程中,超导腔的失谐,是通过腔的频率调谐系统来保证腔工作在工作频率上的,而在测量过程中则是通过锁相环系统,使信号源的频率跟踪超导腔谐振频率的变化,从而使超导腔满足测量要求.但是,不论超导腔频率调谐系统,还是频控环跟踪系统,其对超导腔失谐量的调谐都是有限的,往往需要对超导腔采取加固来减小失谐量,以满足要求.而对于某些工作在脉冲模式下的强流质子加速器,克服超导腔动态洛伦兹力失谐造成的不稳定性,是射频超导领域中的关键技术,并且也是具有挑战性的难题.因此对超导腔

进行洛伦兹力,特别是动态洛伦兹力的失谐分析就显得十分必要.

在我们的强流质子直线加速器方案中,中高能段将采用不同 β 值的纯铌超导腔串(初步选择为 5cell, 2 段或者 3 段),其工作频率为 704MHz,而对单 cell 腔的研究正是研究多 cell 腔的基础,因此本文将 704MHz/ $\beta=0.45$ 单 cell 纯铌超导腔为模型,对其进行静态洛伦兹力失谐分析和动态洛伦兹力失谐分析,并给出相应的加固方案.

2 超导腔静态洛伦兹力失谐分析

超导腔内高频电磁场产生的洛伦兹力,作用于超导腔内表面,其大小为^[3]

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

式中 H 和 E 分别为表面磁场强度和表面电场强度,其大小由超导腔加速梯度 E_{acc} 决定.洛伦兹力导致腔体产生微米量级形变,致使超导腔的谐振频率发生偏移,即超导腔的洛伦兹力失谐,其失谐量由以下公式确定:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{4W} \int_{\Delta V} (\epsilon_0 E^2 - \mu_0 H^2) dV, \quad (2)$$

其中

2004-07-20 收稿

1) E-mail: gemq@ihep.ac.cn

2) E-mail: zhaosc@ihep.ac.cn

$$W = \frac{1}{4} \int_V (\epsilon_0 E^2 + \mu_0 H^2) dV, \quad (3)$$

式中 W 是超导腔的储能, f_0 是未失谐时超导腔的谐振频率.

使用 SUPERFISH 程序作为超导腔电磁场分析工具, 将 ANSYS 程序作为超导腔结构分析工具. 计算出腔内电磁场的分布, 以及相应的洛伦兹力的分布, 将腔形参数和与之对应的洛伦兹力分布输入到 ANSYS 程序中, 计算出静态洛伦兹力作用下腔体的形变. 然后再将形变后的腔形参数重新输入到 SUPERFISH 程序中, 即可以计算出失谐量.

对于我们的 704MHz/ $\beta = 0.45$ 单 cell 纯铌超导腔, 腔形参数如表 1 所示. 铌材特性如表 2 所示^[4].

表 1 腔形参数

单元腔长	$L_c = 95.8\text{mm}$
腔直径	$D = 387\text{mm}$
颈孔半径	$R_i = 50\text{mm}$
束管长度	$L_b = 210\text{mm}$
腔顶直线段	$L_{eq} = 4\text{mm}$
腔壁倾斜角	$\alpha = 5^\circ$
腔颈椭圆半轴比 b/a	2
腔顶椭圆半轴比 B/A	2
腔壁厚	$h = 4\text{mm}$

表 2 铌材特性

杨氏模量	103GPa
泊松比	0.38
密度	$8.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

洛伦兹力在腔内分布状况如图 1 所示.

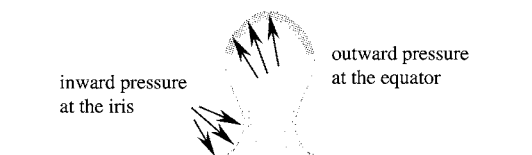


图 1 洛伦兹力分布(形变比例放大 10 万倍)

由图 1 中可知, 在超导腔赤道附近, 洛伦兹力方向朝外, 超导腔发生向外形变, 而在腔颈处方向朝内, 超导腔产生向内的形变, 腔形形变如图 2 所示. 根据公式(2)可知, 在洛伦兹力的作用下, 超导腔的谐振频率将降低.

由 ANSYS 程序计算得到失谐量以及最大形变量与 E_{acc} 的关系, 如表 3 以及图 3 所示.

表 3 频率偏移以及最大形变量与 E_{acc} 的关系

$E_{acc}/(\text{MV/m})$	最大形变量/m	$\Delta f/\text{Hz}$
1	0.402×10^{-7}	90
2	0.161×10^{-6}	340
3	0.362×10^{-6}	770
4	0.643×10^{-6}	1370
5	0.1×10^{-5}	2140
6	0.145×10^{-5}	3080
7	0.197×10^{-5}	4190
8	0.257×10^{-5}	5470
9	0.326×10^{-5}	6920
10	0.402×10^{-5}	8540

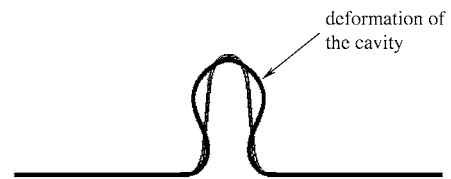


图 2 腔形形变(形变比例放大 10 万倍)

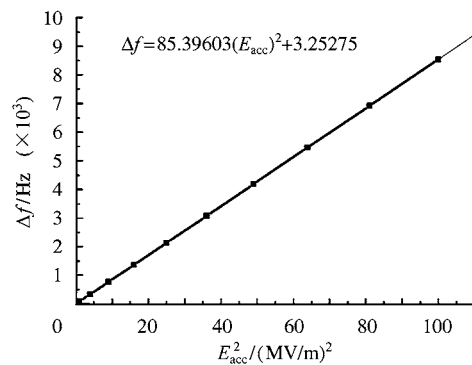


图 3 失谐量与 E_{acc} 的关系

由图 3 可知, 频率偏移与 E_{acc}^2 成正比关系, 即

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

式中 K_L 称为洛伦兹力失谐因子, 其表征了超导腔的机械稳定性, K_L 愈小说明超导腔愈稳定, 对于本例 $K_L = 85.39603 \text{Hz}/(\text{MV/m})^2$, 而我们的超导腔要求工作在加速梯度 $E_{acc} = 10 \text{MV/m}$, 因此超导腔静态洛伦兹力失谐量 $\Delta f = 8540 \text{Hz}$. 对于超导腔静态洛伦兹力

失谐,可采用腔的慢调谐系统一般为机械调谐系统进行调谐.而上述计算结果显然远远超过了调谐系统的调谐范围.因此需要采取相应的加固措施,将超导腔洛伦兹力失谐因子控制在 10 左右,即 $K_L \approx 10$.

3 超导腔动态洛伦兹力失谐分析^[1]

工作在脉冲模式下的超导腔,由于受到 RF 脉冲(即前馈功率脉冲 P_f)的激励,导致超导腔产生动态失谐.本例采用梯形脉冲形态来近似模拟 E_{acc} 脉冲,即脉冲的上升沿为 1ms,下降沿为 1ms,持续时间为 2ms,总共脉宽为 4ms,脉冲高度为 10MV/m,重复频率为 50Hz.将随时间变化的洛伦兹力输入 ANSYS 程序,并计算出与之相应的腔形变化,通过 SUPERFISH 程序计算出超导腔的动态失谐量.计算结果如图 4 所示.

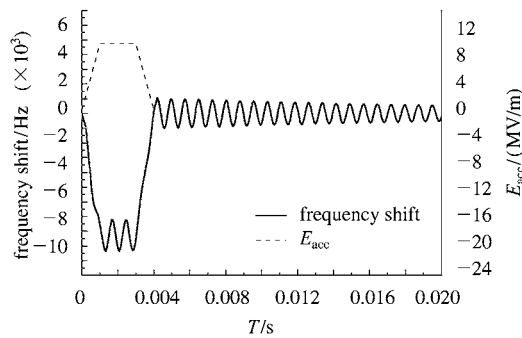


图 4 超导腔的动态失谐量

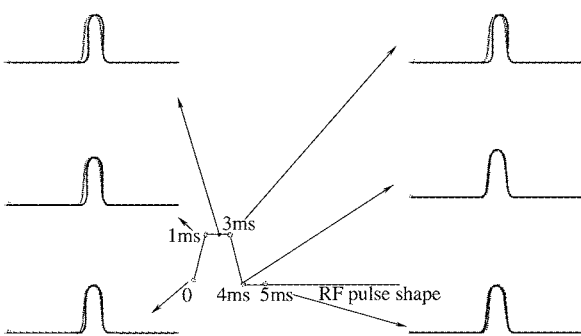


图 5 不同时刻腔体的形变

由图 4 可知,RF 脉冲的激励对超导腔产生了两种作用:一是在脉冲平顶处产生洛伦兹力动态失谐,失谐量约为 -8500Hz ,二是在脉冲的平顶处和脉冲结束后腔体均产生机械共振,共振周期约为 0.75ms .在下一个 RF 脉冲过程中同样重复这一过

程.如图 5 所示,腔体在不同时刻的形变状况: $t = 0.2\text{ms}$ (脉冲上升沿,最大形变 $DMX = 0.353\mu\text{m}$, $\Delta f = -860\text{Hz}$), $t = 1\text{ms}$ (脉冲平顶开始处, $DMX = 3.45\mu\text{m}$, $\Delta f = -7530\text{Hz}$), $t = 2\text{ms}$ (脉冲平顶, $DMX = 4.37\mu\text{m}$, $\Delta f = -9280\text{Hz}$), $t = 3\text{ms}$ (脉冲平顶结束处, $DMX = 3.99\mu\text{m}$, $\Delta f = -8550\text{Hz}$), $t = 4\text{ms}$ (脉冲结束处, $DMX = 0.113\mu\text{m}$, $\Delta f = 220\text{Hz}$), $t = 5\text{ms}$ (没有脉冲, $DMX = 0.506\mu\text{m}$, $\Delta f = 960\text{Hz}$).

超导腔动态洛伦兹力失谐属于频率的快变化,不能够通过腔的慢调谐系统来进行调谐,而只能通过腔的快调谐系统进行调谐,如采用压电陶瓷的频控环进行补偿,考虑到调谐量限制的问题,需要采取措施对超导腔进行加固,将失谐量限制在数百赫兹左右,并尽量消除由洛伦兹力引起的机械共振.

4 超导腔的加固

增加超导腔机械稳定性的方式主要有两种:1)增加超导腔的壁厚.2)采用加强筋对超导腔进行加固.首先来看壁厚对超导腔机械稳定性的影响,图 6 所示超导腔洛伦兹力失谐因子与超导腔壁厚之间的关系.

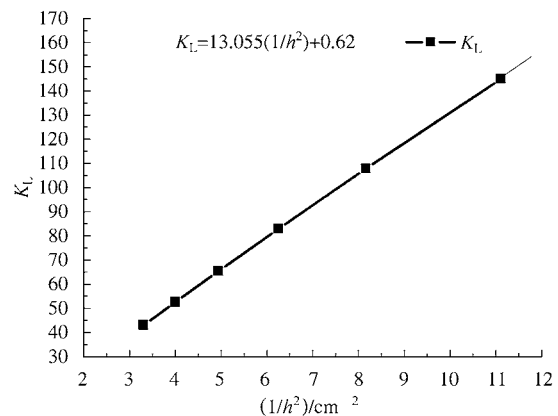


图 6 壁厚 h 与失谐因子关系

从图 6 可以看出超导腔的失谐因子大小与壁厚 h 平方的倒数成正比关系,因此通过增加厚度可以一定程度地改善超导腔机械稳定性.但是超导腔壁厚的增加,将导致腔体导热性能的下降,因此采用加强筋来增加超导腔的机械稳定性是通常的选择.

采用图 7 所示的加强筋形式对超导腔进行加

固^[5],图中 R 为加强筋环半径. 我们优化设计了加强筋环半径 R 与超导腔洛伦兹力失谐因子的关系(壁厚 $h = 4\text{mm}$),结果如图 8 所示.

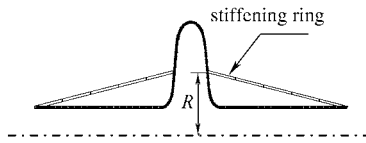


图 7 超导腔的加强筋

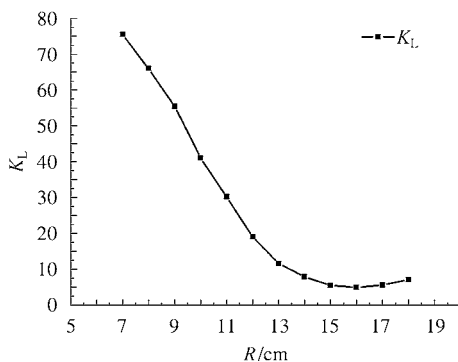


图 8 R 与失谐因子的关系

由图 8 中可知,采用加强筋可以显著的减小超导腔洛伦兹力失谐因子,提高超导腔的机械稳定性.加强筋环半径 $R = 16\text{cm}$ 时,得到最小洛伦兹力失谐因子 $K_L = 4.9$. 图 9 所示经过加强筋加固后的腔体的动态失谐情况.

比较图 9 和图 4,不难发现经过加强筋加固后的超导腔比未经加固的超导腔,动态失谐量减小约 20 倍,而且有效克服了腔体机械共振.

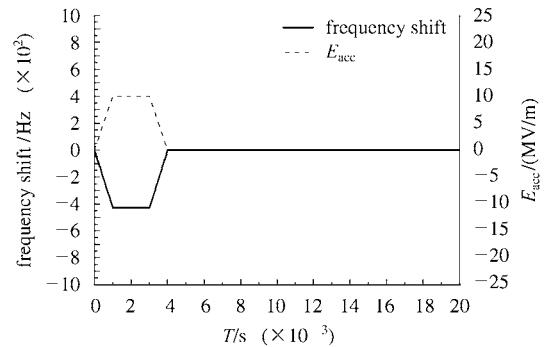


图 9 加固后超导腔的动态失谐量

经过以上的计算分析,对于 $704\text{MHz}/\beta = 0.45$ 单 cell 纯铌超导腔,选取的加固方案为:壁厚: $h = 4\text{mm}$;加强筋环半径: $R = 16\text{cm}$.机械稳定性:洛伦兹力失谐因子: $K_L = 4.9\text{Hz}/(\text{MV}/\text{m})^2$;最大动态失谐量: $\Delta f = 440\text{Hz}$. 完全满足设计要求.

5 结论

目前,世界上各实验室对于超导腔的洛伦兹力失谐的研究日益重视.通过对 $704\text{MHz}/\beta = 0.45$ 单 cell 纯铌超导腔的静态洛伦兹力失谐和动态洛伦兹力失谐的模拟计算分析,最终确定了适用于高能物理研究所强流质子直线加速器预研工程中的超导腔加固方案.

作者感谢方守贤院士对高能物理研究所开展射频超导技术研究方面所做出的大力支持,同时感谢傅世年教授和孙虹副教授对本文的有益指导.

参考文献 (References)

- SAITO K. KEK Preprint, 2000,99—197
- FU Shi-Nian et al. China Nuclear Science and Technology Report, CNIC-01638/11, CNNC-0003. 2001. 110—135 (in Chinese)
- Aune B et al. Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2000, 3:092001
- <http://www.matweb.com>
- Hasan Padamsee et al. RF Superconductivity for Accelerators. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1998. 439—459

(傅世年等. 中国核科技报告, CNIC-01638/11, CNNC-0003. 2001. 110—135)

Lorentz Force Detuning Analysis of 700MHz Single-cell Superconducting Cavity

GE Ming-Qi¹⁾ ZHAO Sheng-Chu²⁾

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract In this paper, the Lorentz force detuning of superconducting cavity is illustrated and discussed in detail. The static Lorentz force detuning and dynamic Lorentz force detuning of a $704\text{MHz}/\beta = 0.45$ single-cell superconducting cavity is calculated with numerical simulation method. And the mechanical stability of the cavity is also studied. Finally a method for stiffening cavity is proposed.

Key words superconducting cavity, Lorentz force, detuning, stiffening

Received 20 July 2004

1) E-mail: gemq@ihep.ac.cn

2) E-mail: zhaosc@ihep.ac.cn