文章编号：1007－4627(2008)03－0249－05

HIRFL-CSR 实验环高频同轴谐振腔设计原理*

许 哲[1,2]，段亚娟[1]，赵红卫[1]，夏佳文[1]，詹文龙[1]

(1 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000；
2 中国科学院研究生院，北京 100049)

摘 要：介绍了同步加速器高频铁氧体加载腔体的设计原理和设计计算过程。详细说明了腔体加载铁氧体材料的作用和意义，并对传统的传输线理论计算结果、CST(Computer Simulation Technology)软件模拟计算结果和实际腔体测量结果进行了比较。

关 键 词：同步加速器；铁氧体；传输线；冷却储存环

中图分类号：TL503.2 **文献标识码**：A

1 引言

作为国家大科学工程冷却储存环 CSR(Cooling Storage Ring)重要组成部分之一的实验环系统，在研制其高频腔时，由于其特殊的脉冲扫频工作模式，必须选用铁氧体作为腔体的加载材料，以使得谐振腔在整个扫频带宽内调谐在激励信号频率上。因此，铁氧体材料加载腔的性能[1]，特别是铁氧体在达到磁饱和前是否能满足 0.5—2.0 MHz 频率范围的要求，将直接影响到实验环腔体的设计指标。

2 CSR 实验环铁氧体加载同轴谐振腔理论计算

同轴线电感与加速缝隙电容或漂移管电容作用产生谐振。它的基本等效电路如图 1 所示，其输入阻抗为

$$Z = \mathrm{j}Z_0 \,\mathrm{tg}\left(\frac{2\pi l}{\lambda_g}\right) 。 \tag{1}$$

当 $l < \lambda/4$ 时，Z_0 呈感性，在输入端并联电容就构成并联谐振电路，并联谐振阻抗的大小取决于同轴线损耗。对无填充介质的空同轴腔，并联谐振阻抗 R_s 非常大，Q 值也很高，其 R_s 通常可达几千欧姆，Q 值过万(例如回旋加速器的真空谐振腔)。由于同步加速器高频谐振腔内填有铁氧体磁性材料，因此 R_s 和 Q 就比较低。

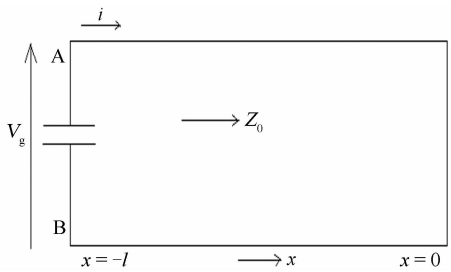

图 1 同轴谐振腔等效电路

图 2 给出了铁氧体加载同轴腔的结构图，铁氧体为圆环形，铁氧体环之间水冷片隔开。设图中内导体半径为 r_1，外导体半径为 r_2，介质的相对有效磁导率为 μ_e，相对有效介电常数为 ε_e[2]，这里的 μ_e 和 ε_e 不一定等于介质的实际相对磁导率 μ_r 和相对介电常数 ε_r，因为介质并不一定填满内外导体之间。μ_0 和 ε_0 是自由空间的磁导率和介电常数。

在 CSR 实验环的高频腔中，铁氧体材料并不是填满同轴腔的内外导体之间，只是部分填充，铁氧体环的内径为 ρ_1，外径为 ρ_2，相对磁导率为 μ_r，相对介电常数为 ε_r($\varepsilon_r \approx 15$)。则填充铁氧体的同轴腔的单位长度电感为

$$L_e = \frac{\mu_0 \mu_e}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \approx L_0 + L_F$$

* **收稿日期**：2007 - 11 - 27；**修改日期**：2008 - 01 - 28
* **基金项目**：国家九五大科学工程冷却储存环项目(06HIRFL200)
作者简介：许 哲(1970—)，男(汉族)，博士研究生，高级工程师，从事高频及其相关技术的研究和应用；
E-mail：zxu@impcas.ac.cn

$$= \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)+\frac{\mu_0\mu_r}{2\pi}\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right), \quad (2)$$

式中，L_0 为无填充的同轴线的单位长度电感。L_F 为磁介质的单位长度电感。从式(2)可以得到：

$$\mu_e \approx 1+\frac{\mu_r\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \approx \frac{\mu_r\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \mu_r \gg 1 \quad (3)$$

因此可得：

$$L_e = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)\mu_r。 \quad (4)$$

填充铁氧体的同轴线单位长度电容(分布电容)为 C_e，C_e 由 C_1，C_2 和 C_3 串接而成，则

$$C_e = \frac{C_1C_2C_3}{C_1+C_2+C_3}, \quad (5)$$

其中，C_1 为填充在铁氧体环和束流管之间的聚四氟乙烯的分布电容，C_2 为铁氧体材料的分布电容，C_3 为无填充磁介质的同轴腔的分布电容。

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r'}{\ln(\rho_1/r_1)},$$

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln(\rho_2/\rho_1)}\frac{l_1}{l},$$

$$C_3 = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln(r_2/\rho_2)}, \quad (6)$$

ε_r' 为聚四氟乙烯的介电常数，ε_r 为铁氧体材料的相对介电常数，l_1 是铁氧体有效填充的长度，l 是腔体的总长度。

图 3 给出了 CSR 实验环同步加速器谐振腔结构简图。它由左右两个相同的终端短路的同轴谐振腔构成，两腔的开路端之间构成加速缝隙，高频功率从缝隙两端馈送入两个腔内。两腔中高频电场方向相反，在开路端，即加速缝隙处形成一轴向高频电场，缝隙两端加有高频电压，用来加速或减速通过缝隙的带电粒子。在谐振腔中，铁氧体没有完全填充同轴腔，铁氧体环的内外半径分别为 ρ_1 和 ρ_2。铁氧体环上绕有偏磁线圈，工作时通过改变偏磁电流来改变铁氧体的磁导率，从而改变腔体的谐振频率，使其进行扫频。图中 C_S 为单腔对地谐振电容。

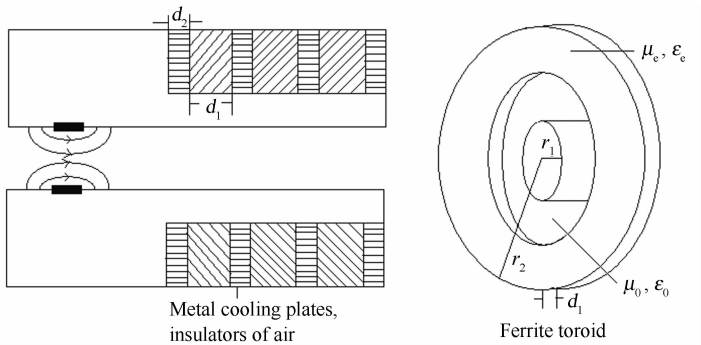

图 2 铁氧体加载同轴腔剖面结构

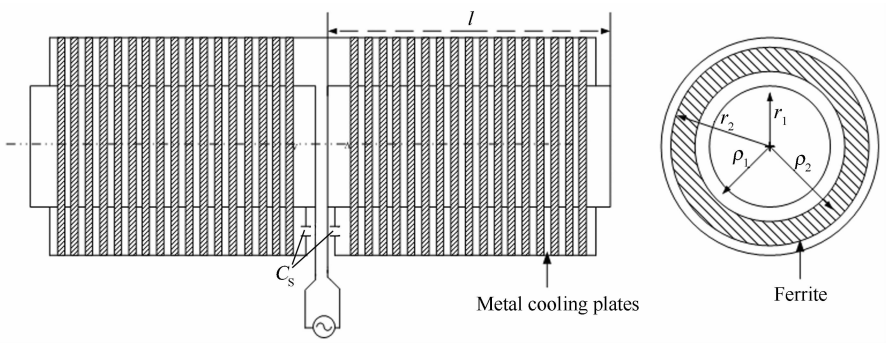

图 3 CSR 实验环腔体结构简图

整个腔体如同一个平衡馈电的半波天线振子。

两腔高频电压相位相反，腔体中间(加速缝隙中间)等效于虚地，所以从馈送端看，两腔等效串联，总输入阻抗等于单腔的 2 倍。

图 4 给出了腔体的等效电路图。图中 L_s 为单腔的等效电感，C 为单腔的分布电容。C_g 为所需加载的集总谐振电容。单腔的长度为 l，则 $L_S=L_e l$，$C=C_e l$。腔体的谐振频率计算公式为

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}}, \tag{7}$$

其中 $C_S=C+2C_g$。

通过改变铁氧体的相对磁导率 μ_r 的值而使单腔的等效电感 L_S 发生改变，从而改变谐振频率，实现高频腔扫频工作的要求。

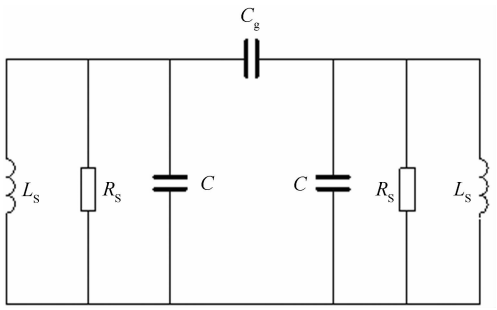

图 4　CSR 实验环腔体等效电路

表 1 给出了 CSR 实验环高频腔的具体尺寸。

表 1　CSR 实验环腔体的尺寸

r_1/mm	r_2/mm	ρ_1/mm	ρ_2/mm	l/mm
140	302	165	300	640

3　CSR 实验环高频谐振腔填充铁氧体的作用

(1) 0.5 MHz 频率的波长为 600 m，在限制其电长度($2\pi l/\lambda_g$)为 10°时，腔体长度也达到 16.7 m，但在我们设计的腔体内填充磁导率 $\mu_r=600$ 的铁氧体材料后，当电长度为 10°时，其腔体长度将缩短为 0.5 m。

(2) 腔体加载的铁氧体环上绕有偏磁线圈，通过改变偏磁电流使铁氧体的相对磁导率 μ_r 发生变化，从而改变同轴谐振腔的电感量，以达到快速调谐或扫频的目的[3]。

(3) 铁氧体材料的 $\mu_r Qf$ 值要尽量高，即铁氧体的损耗要小，$\mu_r Qf$ 的值在全工作频段范围内变化要小。实际的铁氧体材料，其 $\mu_r Qf$ 值随 f 的升高而下降，少则 1 倍，多则 5—6 倍。在我们设计的腔体测量中，当 f 从 0.5 MHz 升高到 2 MHz 时，$\mu_r Qf$ 值下降了 5 倍。

(4) 腔体加载的铁氧体环数目多，即 l_1 大，但是 l_1 的长度要受到下列因素的限制：谐振腔短路端高频电流大，磁感应强度大，愈向开路端方向高频电流越小，磁感应强度愈小；而愈向内导体方向磁感应强度越大。最大磁感应强度 B_{max} 应该限制在 1×10^{-2} T 左右，过大则可能出现“高频损耗效应”，导致铁氧体损耗急剧增加，所以要求腔体内最大电流与最小电流比限制在 10%以内。

4　CSR 实验环腔体的仿真

对于 CSR 实验环高频腔体的仿真，我们采用了 CST 微波工作室仿真软件。CST 微波工作室是直接基于电磁场基本方程——麦克斯韦方程组的交互式程序。它采用有限积分法(FIT)将麦氏方程组离散化在一对共轭网格上，使麦氏方程组化为一组代数矩阵方程，从而使方程的求解大大简化。它的优点是可以模拟任何复杂的三维腔体结构并可计算出几乎所有的谐振模式，而且计算精度高，尤其是谐振频率。我们根据图 3 中给出的腔体的形状和尺寸用 CST 微波工作室模拟计算不同的铁氧体相对磁导率下谐振频率的变化。图 5 给出了模拟得出的谐振频率随铁氧体相对磁导率的变化曲线。从图中

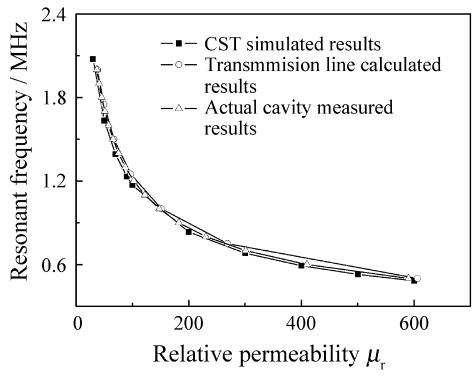

图 5　传输线理论计算、CST 仿真与实际腔体测量的比较

可以看出，随着铁氧体的磁导率的改变，腔体的频率在 0.49—2.1 MHz 范围内变化。图 6 给出了软

件仿真得到的腔体加速缝隙中心处的电场分布。从图中可以看出，最大电压分布在 23.7 kV 左右，因为在腔体仿真中有许多理想情况在实际中是达不到的，所以实际的腔体电压一定会比仿真结果略小。CSR 实验环腔体的要求加速电压为 $V_{p\text{-}p}=20$ kV，可见设计的腔体完全满足 CSR 实验环系统对腔体电压的要求。

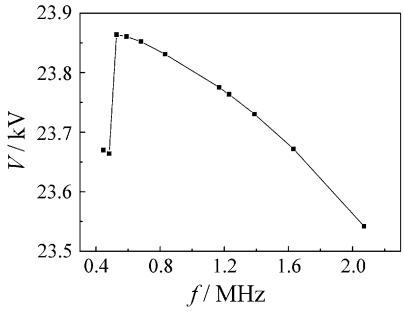

图 6 CSR 实验环腔体加速缝处电场分布

5 结果及讨论

根据铁氧体环测试中得到的数据，首先确定腔体谐振频率 $f=0.5$ MHz 时的导磁率为 $\mu_r\approx606$，由公式计算可得出单腔同轴电感 L_S，再根据 $f=1/2\pi\sqrt{L_S C_S}$ 算出腔体的谐振电容 $C_S=2\ 800$ pF，那么单腔体所需加载的集总参数谐振电容 $2C_g=C_S-C\approx2\ 600$ pF。最后根据 f，C_S 和求出不同频率下的 L_S，从而求出相对应的 μ_r 值。计算的谐振频率 f 与铁氧体的磁导率 μ_r 的关系曲线显示在图 5 中。根据要求的电压 $V_{p\text{-}p}=20$ kV，则单个腔体的电压峰值为 5 kV，表 2 给出了理论计算的参数结果。

对于腔体谐振频率随相对磁导率的变化，传统的传输线理论计算以及 CST 仿真结果与最后将实际制作的腔体测量结果进行比较(见图 5)。实际测量中，得到的是一组腔体谐振频率随偏磁电流变化的数据，根据文献[1]给出的测量方法可以得出频率和铁氧体相对磁导率 μ_r 之间的变化关系。从图中可以看出计算结果和仿真结果以及测量结果非常一致，随铁氧体磁导率的变化，谐振频率范围分布在 0.49—2.1 MHz 之间，能够满足 CSR 实验环扫频工作的要求。

表 2 CSRe 高频腔单腔的参数理论计算结果

f/MHz	R_S/Ω	$p=(V^2/2R_S)$/kW
0.5	2 800	4.5
0.75	2 400	5.2
1.0	1 600	7.8
1.25	1 400	9
1.5	1 000	12.5
1.75	800	15.6
2.0	480	26

6 结论

从理论计算、软件仿真以及最后的实际测量来看，它们的结果是很接近的，即我们的理论计算非常符合实际腔体的测量结果。也就意味着在腔体理论设计过程中，无论是传统的传输线计算还是 CST 微波工作室软件仿真都是可信和可靠的，同时对腔体设计有着实际的理论指导意义。

参考文献(References)：

[1] Xu Zhe, Wang Chunxiao. High Power Laser and Particle Beams, 2005, **17**(9): 1 431(in Chinese).
(许 哲，王春晓. 强激光与粒子束，2005，**17**(9)：1 431.)

[2] Gardner I S K. Ferrite Dominated Cavity. Geneva: CERN Accelerator School, RF Engineering for Particle Accelerators, 1992, 349—369.

[3] Katayama T, Yoshizawa M, Watanabe S, *et al*. Nucl Instr and Meth, 1993, **336**(3): 391.

Design Principle of RF Coaxial Resonant Cavity at HIRFL-CSRe*

XU Zhe[1, 2, 1)], DUAN Ya-juan[1], ZHAO Hong-wei[1], XIA Jia-wen[1], ZHAN Wen-long[1]

(1 *Institute of Moden Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Lanzhou* 730000, *China*;

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In this paper, the principle and the process of design and calculation based on RF ferrite loaded coaxial cavity in synchrotron are presented. The function and significance of cavity loaded by ferrite are elaborated in detail. Then the calculated results by traditional transmission line theory, software simulated results by Computer Simulation Technology(CST) and the actual cavity measured results are compared.

Key words: synchrotron; ferrite; transmission line; computer simulation technology

* **Received date**: 27 Nov. 2007; **Revised date**: 28 Jan. 2008

* **Foundation item**: Cooling Storage Ring of National Key Science Engineering Project(06HIRFL200)

1) E-mail: zxu@impcas.ac.cn