

SSC 高频腔数值模拟及分析^{*}

李智慧¹⁾ 郑启文 高宜海 张生虎 吴健强 魏铭 郁奇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 SSC 加速电压的提高对于 HIRFL 整体运行水平的提高具有重要的意义. 利用三维电磁场计算程序 MAFIA 对 SSC 高频腔体作了更为细致的分析, 重新计算了腔体的主要参数, 结合运行中的实际结果, 对电压提高的可行性进行了初步分析; 由于在大功率运行状态下, 少量的功率损失都可能影响腔-机系统的稳定性, 所以同时利用 MAFIA 计算得到的结果, 对功率耦合系统重新做了分析, 得到了功率反射的理论极值及改进方案.

关键词 SSC 高频腔 MAFIA 程序 匹配 耦合

1 引言

兰州重离子研究装置(HIRFL)由两台回旋加速器组成, 其中主器(SSC)是一台分离扇回旋加速器. 其高频系统由两台发射机、两个腔体及相应的稳定装置组成, 其中两台高频腔体设计参数完全相同, 均为翼型腔体, 如图1所示. 自从1988年建成出束以来, 整个高频系统始终运行于较低的水平, 如D盒

电压一般运行在90kV左右(中间频率), 距设计所要求的电压(100kV(6.5MHz)—250kV(14MHz))有很大的差距. 为了CSR大科学工程的总体需要, 尤其是对束流流强及束流品质的要求, 必须将HIRFL-SSC高频系统提升到一个新的运行水平, 即至少达到设计所要求的水平. 由于整个高频系统是由发射机和腔体组成的复杂系统, 为了分析方便, 我们首先对发射机和腔体分别进行分析研究, 然后再考虑整个系统. 本文主要介绍了我们利用MAFIA程序对SSC高频腔体的模拟分析结果.

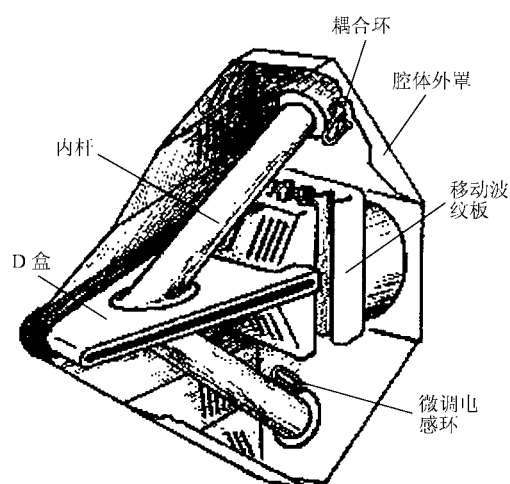


图1 SSC 高频腔示意图

2 模拟结果

谐振频率测量值与计算值如图2所示. 由图可见, 计算值和测量值符合较好, 从整个工作频段来看, 有一个很均匀的大约0.5MHz的误差. 结合MAFIA对其他腔体的模拟结果^[1], 我们认为此误差并不是由MAFIA的计算精度导致的, 而是由动板零位误差引起的系统误差. 由于找不到确切的数据, 我们在计算中认为零位在25mm处, 而根据计算结果来看, 零位似乎应在30mm处. 如果这样, 计算值将和测量值较好地符合.

2004-05-24 收稿

^{*} HIRFL-CSR 大科学工程 HIRFL 改造子课题资助

¹⁾ E-mail: Zhihui.li@impcas.ac.cn

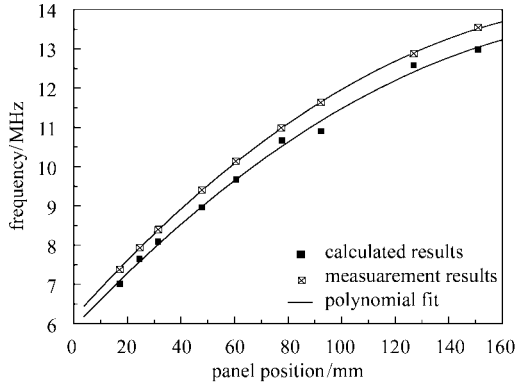


图 2 计算及测量得到的 SSC 高频腔谐振频率曲线

由于在计算中没有考虑外电路的影响,所以计算出的 Q 值只能是空载 Q 值;同时由于我们的耦合装置是固定的,所以无法通过改变耦合来逼近空载 Q 值.这就决定了我们计算得到的 Q 值无法和测量得到的结果进行比较,计算它的目的是为了检测腔体的性能及计算其他参数的需要.计算结果如图 3 所示.

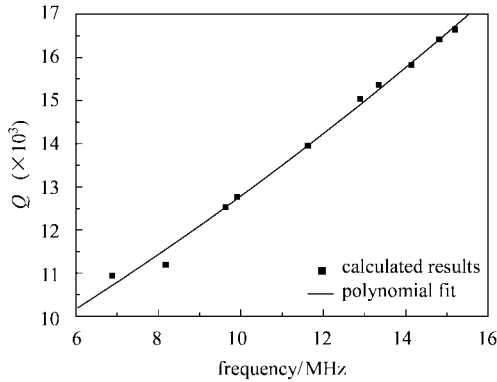


图 3 Q 值计算结果

由于程序计算方法上的问题,一般来说,计算结果偏大,实际值大约是计算值的 $1/2-2/3$ ^[2].

并联阻抗是表征腔体性能的主要参数之一.如果有效加速电压用 V_{eff} 表示,在此电压水平下的腔体平均损耗功率用 P 表示,则并联阻抗可定义为:

$$R_{\text{shunt}} = V_{\text{eff}}^2 / (2P), \quad (1)$$

R_{shunt} 只与腔体形状有关,而与工作时的功率状态无关.所以,我们可以借助小功率来测量腔体的并联阻抗,然后利用并联阻抗及所需要有效电压预测所需要的功率.对于 SSC,我们在利用 MAFIA 得到腔体内的场分布后,由于工作频率较低(约 6—

15MHz),加速间隙相对与波长很小,所以利用电场沿加速间隙进行积分,即可得到此时的有效加速电压;同时,由腔体内的磁场分布,可以得到腔壁上的面电流分布,从而得到腔体的功率损耗.然后利用(1)式,可得到各个频率下的并联阻抗,结果如图 4 所示.在整个频段上,并联阻抗从频率低端的 150k Ω 上升到频率高端的 800k Ω .考虑到 MAFIA 在功率计算中的误差,实际值取计算值的一半,即 75k Ω 到 400k Ω .表 1 给出了 SSC 运行中得到的一些数据,其中 P_D 为发射机的直流功率, η 为发射机的效率, R_M 为由运行参数得到的并联阻抗, R_C 为由 MAFIA 计算得到的并联阻抗.从表 1 中可见,由这些数据得到的并联阻抗与计算值基本符合.

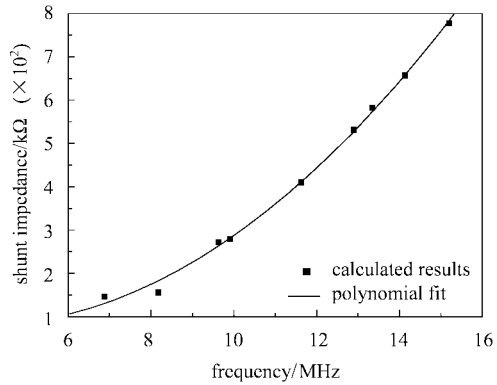


图 4 并联阻抗

表 1 SSC 发射机运行典型参数及腔体并联阻抗

Frequency/MHz	V_{Dee}/kV	P_D/kW	$\eta\%$	$R_M/\text{k}\Omega$	$R_C/\text{k}\Omega$
7.4	90	90	60	75	75
13	150	90	60	208	280

SSC 的腔体设计最大功率为 100kW,在此功率水平下,利用计算的并联阻抗可以得到 D 盒电压范围为 118—280kV.而设计电压范围为 90—250kV,整体偏高约 30kV.可见如果发射机能提供设计要求的输出功率,则 SSC 的 Dee 电压设计值是可以达到的.

对于回旋加速器来说,加速电压沿半径的分布也是一个非常重要的参数.但是由于回旋加速器腔体庞大,加速间隙很长,所以要想测量加速电压沿半径的分布是件非常复杂的工作.图 5 给出了由 MAFIA 得到的加速电压沿半径的分布.由图可见,加速电压沿半径先减小,到大约内杆附近时,变到最小,然后随着半径增大又增大.变化趋势随频率增大而减小.在 6.8MHz 时,最大半径处的电压约为最

小半径处的 1.32 倍. 而到 15.2MHz 时,最大半径处的电压和最小半径处的电压近似相等. 这种变化趋势是由腔体的频率调节方式所决定的. 如图 1 所示,SSC 高频腔谐振频率的改变是通过改变移动波纹板的位置来实现的. 在频率低端时,移动波纹板和固定波纹板间的距离最小,电容最大. 从传输线理论的角度来看,大半径和外壳之间的电长度要大于小半径处,所以大半径处的电压远大于小半径处. 而到频率高端时,移动波纹板移到了最外端,大半径处和小半径处基本对称,所以电压也基本相同.

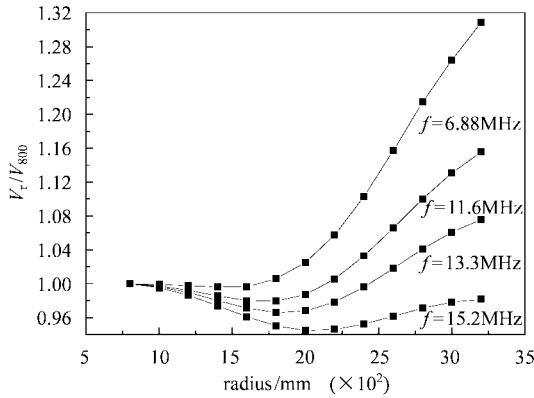


图 5 加速电压沿半径的分布

3 腔体和发射机的耦合

腔体与发射机的匹配在加速器高频技术领域是一个非常重要的问题. 在大功率运行时,好的匹配不仅可以减小所要求的发射机输出功率,同时也是发射机、馈管及腔体安全稳定工作的前提条件之一. 对于电感耦合方式,腔体和发射机的匹配是通过改变耦合环和腔体间互感的大小来实现的. 如果把腔体等效为 RLC 并联回路,则所需互感的大小和腔体参数之间满足以下关系^[3]:

$$M = \frac{\sqrt{Z_0 R}}{\omega_0 Q}, \quad (2)$$

$$L_c = \frac{Z_0}{\omega_0 Q} \left(1 + Q^2 \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0^2} \right), \quad (3)$$

其中 M 为所需互感, Z_0 为馈管特性阻抗, Q 为腔体空载 Q 值, R 为腔体的并联阻抗, ω_0 为腔体的谐振频率, L_c 为耦合环本身的电感. 由(3)式可见,通过腔体微小的失谐,(3)式总是可以满足的. 所以对于腔体和发射机的匹配,我们只需要考虑(2)式就可以

了. 利用 MAFIA 计算得到的腔体参数,可以得到理想匹配所需要的互感,如图 6 所示.

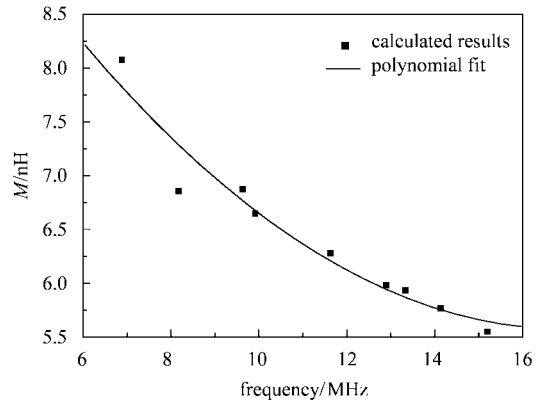


图 6 不同频率下理想匹配所需互感

由图 6 可见,为了在整个频段内达到理想匹配,腔体和耦合环间的互感应从约 5.5nH 到 8nH 之间变化. 原则上来说这可以通过改变耦合环相对与内杆的角度来实现,或通过改变耦合环的大小来实现. 对于 SSC 高频腔,当初设计时由于考虑到机械和真空等方面的因素,耦合环的角度和大小在安装后都是不能改变的. 所以我们只能在安装时选取一个合适的角度和耦合环的大小,以实现在整个频段上的近似匹配. 根据现有耦合环的尺寸,可以得到其最大互感约为 8.3nH. 如果取耦合环与内杆的夹角为 30°,则所对应高端和低端等效电阻分别为:

$$R_{low} = (\omega_0 M_{30} Q_7)^2 / R_7 = 40.31\Omega, \quad (4)$$

$$R_{high} = (\omega_0 M_{30} Q_{15})^2 / R_{15} = 78.09\Omega, \quad (5)$$

由此造成的低端和高端功率反射系数,也是整个频段的最大反射系数为:

$$\Gamma_{low}^2 = \left(\frac{Z_c - R_{low}}{Z_c + R_{low}} \right)^2 = 1.2\%, \quad (6)$$

$$\Gamma_{high}^2 = \left(\frac{Z_c - R_{high}}{Z_c + R_{high}} \right)^2 = 4.8\%, \quad (7)$$

由上式可见最大功率反射系数小于 5%. 对于 SSC 发射机,其最大输出功率为 120kW,如果考虑到这 5%的反射,可输送给腔体的最大功率为 114kW,完全可以满足 100kW 的设计功率. 据此我们可以认为,目前的耦合环是可以满足匹配要求的,耦合环与内杆间的夹角应取为 30°.

4 结论

通过上述分析可见,如果发射机可以提供腔体

设计所要求的功率,即 100kW,则理论设计所要求的 Dee 电压是可以达到的,现有的耦合环也可以满足功率耦合及发射机和腔体间阻抗匹配的要求. 对于

SSC 高频腔体来说,下一步的主要工作是改进腔体的控制保护装置以满足在大功率条件下长期、稳定、安全运行的需要.

参考文献 (References)

- | | |
|---|---|
| <p>1 Corlett J N. CERN 92-03, 1992, 2: 309</p> <p>2 Kamigaito O, Goto A et al. RIKEN Accel. Prog. Rep., 1997, 30:</p> | <p>191</p> <p>3 LI Zhi-Hui, TANG Jing-Yu. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(1): 107 (in Chinese)</p> <p>(李智慧,唐靖宇. 强激光与粒子束, 2000, 12(1):107)</p> |
|---|---|

Numerical Simulation and Analysis of SSC RF Cavity*

LI Zhi-Hui¹⁾ ZHENG Qi-Wen GAO Yi-Hai ZHANG Sheng-Hu WU Jian-Qiang WEN Ming YU Qi
(Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract It is important for HIRFL to improve the whole operation level if SSC accelerating voltage can be increased. In order to increase the voltage, it should firstly analyze the maximum voltage that SSC RF cavity can achieve in theory. SSC RF cavity was thoroughly analyzed and the main parameters of the cavity were obtained by using a three-dimensional electromagnetic calculation code. Based on the simulation results and the practical operation parameters the possibility of increasing the voltage is discussed. Since the little power loss in high-power operation may affect the stability of the cavity-amplifier system, the power coupling system was also analyzed. The limit of power reflection is got and the improving methods are discussed too.

Key words SSC RF cavity, MAFIA code, match, couple

Received on May 24, 2004

* Supported by the HIRFL-CSR Scientific Project

1) E-mail: Zhihui.li@impcas.ac.cn