

加速器电容耦合的研究*

李智慧¹⁾

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 首先从腔体的等效集总参数电路出发, 推导出了腔体等效输入阻抗和腔体特性参数, 如谐振频率、并联阻抗及耦合电容的关系. 以此为出发点, 得到了理想耦合所需要的耦合电容大小和腔体参数的关系, 总结出了高频腔体电容耦合系统设计的一般方法. 以一台质子回旋加速器模型腔体为例, 对计算结果和测量结果进行对比分析, 讨论了其结果的可靠性及使用范围.

关键词 电容耦合 匹配 反射系数

1 引言

高频系统作为现代射频加速器的一个主要系统, 其稳定性和可靠性对整个加速器来说是非常重要的. 耦合装置作为连接高频系统两大子系统——发射机和腔体的关键设备, 对高频系统的安全、可靠运行起着非常重要的作用. 耦合装置的主要作用是将发射机输出的高频功率馈送到腔体以产生加速离子所需要的高频电场. 为了有效地将发射机输出的高频功率馈送入腔体, 耦合系统还担负着另一个重要任务, 即阻抗变换的作用. 由于发射机有可能远离腔体, 高频功率常常需要通过较长的传输线输送到腔体. 一般来说, 腔体是一个高阻装置, 而传输线一般是标准传输系统, 即特性阻抗为 50Ω 的传输线(低频), 所以必须进行阻抗变换, 即将腔体变换为 50Ω 的阻抗, 以便和传输系统匹配. 耦合的方式很多, 在离子加速器中常用的主要是磁耦合(耦合环耦合)和电耦合(电容耦合)两种方式. 对于磁耦合在文献[1]中作了较为详细的分析, 本文主要介绍电容耦合系统的设计.

2 耦合电路分析

耦合系统的设计方法主要有两种: 等效电路分析及数值模拟. 相对于数值分析而言, 通过等效电路分析可以得到耦合系统对腔体各个参数的依赖关系, 同

时计算速度也要远远快于数值模拟, 并且其结果可以作为数值模拟的初始值, 这样数值模拟时只需要在很小范围内扫描, 从而较快地找到最佳结果. 从这个意义上来说, 这两种方法是互补的. 对于一个高频腔体, 我们总可以将其等效为一个并联RLC回路. 由于对 L 和 C 测量比较困难, 回路特性一般是通过腔体容易测量的参数谐振频率 ω_0 、品质因数 Q_0 及并联阻抗 R 来表征的. ω_0 , Q_0 和 R 与 L , C 之间有以下关系:

$$R = \frac{V_{\text{eff}}^2}{2P}, \quad (1)$$

$$L = \frac{R}{\omega_0 Q_0}, \quad (2)$$

$$C = \frac{Q_0}{\omega_0 R}, \quad (3)$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad (4)$$

其中 V_{eff} 为加速间隙的等效电压, P 为腔体损耗总功率. 考虑到耦合电容 C_c , 整个腔体可等效为如图1所示的电路. 其输入阻抗为

$$Z_{\text{in}} = \frac{1}{j\omega C_c} + \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{R}}, \quad (5)$$

其中 ω 为工作角频率. 将公式(1)–(4)代入公式(5)并化简得:

$$Z_{\text{in}} = Z_r + jZ_i,$$

2005 - 11 - 01 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

其中

$$Z_r = \frac{R}{1+T^2}, \quad (6)$$

$$Z_i = -R \left\{ \frac{T}{1+T^2} + \frac{f/f_0}{Q_0(C_c/C_0)} \right\}, \quad (7)$$

分别为输入阻抗的实部和虚部, f 为工作频率, f_0 为空腔谐振频率, $T = Q_0(f/f_0 - f_0/f)$, 达到最佳耦合, 即理想匹配的条件为

$$Z_r = Z_0, \quad (8)$$

$$Z_i = 0, \quad (9)$$

由(6)式及(8)式可见, 为了达到理想匹配, 腔体的工作频率应偏离腔体的谐振频率, 偏移量由腔体空载品质因数 Q_0 、腔体并联阻抗 R 以及传输线的特性阻抗 Z_0 决定. 为了同时使(9)式得到满足, 耦合电容的大小必须要使(7)式为零. 也就是说为了达到理想匹配, 腔体和耦合电容必须同时调谐, 以使(8)式及(9)式同时得到满足, 这在实际中是很难达到的, 实际工作中(8)和(9)式只是近似得到满足.

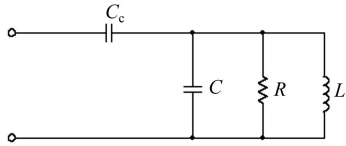


图 1 腔体等效电路

将(6)式代入(8)式, 可以得到使输入阻抗实部与传输线的特性阻抗相等的腔体工作频率与空腔谐振频率的比值:

$$f/f_0 = \frac{\sqrt{R/Z_0-1}}{Q_0} \left(\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2Q_0}{\sqrt{R/Z_0-1}} \right)^2} - 1}{2} \right), \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式可以得到所需要的耦合电容与腔体等效电容 C_0 的比值

$$C_c/C_0 = \frac{1}{2Q_0^2} \frac{R}{Z_0} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2Q_0}{\sqrt{R/Z_0-1}} \right)^2} - 1 \right). \quad (11)$$

腔体和发射机的匹配状态通常是用电压反射系数 Γ 来描述的. 特性阻抗为 Z_0 的传输线和阻抗为 Z 的负载间的反射系数为

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (12)$$

将(6), (7)式代入(12)式, 可得反射系数幅度和相位与频率的关系为

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{(Z_r - 50)^2 + Z_i^2}{(Z_r + 50)^2 + Z_i^2}}, \quad (13)$$

$$\tan(\varphi_r) = \frac{2Z_0Z_i}{|Z|^2 - Z_0^2}. \quad (14)$$

3 空载 Q 值对耦合系统的影响

空载 Q 值是反映腔体特性的一个主要参数. Q_0 值的大小主要由腔体类型和腔体表面的加工状况决定. 对于同一类型的腔体, 腔体表面加工越好, 则腔体的空载 Q 值越高; 对于不同类型的腔体, 如果腔体体积和表面积的比值越大, 则腔体的空载 Q 值越高. 但是对于同一类腔体, 空载 Q 值和腔体并联阻抗的比值却是固定的, 并不因腔体表面状况的不同而不同. 研究同一类腔体空载 Q 值和耦合电容的大小是非常有意义的, 因为在实际工作中, 我们常常需要通过一些模型实验来指导实际腔体的设计, 模型腔体和实际腔体的最大不同就是模型腔体的表面加工要粗糙得多, 所以模型腔体和实际腔体的 Q_0 值有时可以相差 1 到 2 个数量级. 图 2 给出了在 Q_0/R 为常数的情况下, 耦合电容大小及腔体工作频率相对于空腔谐振频率的偏移跟腔体空载 Q 值的关系. 其中 $Q_0/R=0.034$, 跟我们的一个模型腔体的测量值一样. 由图可见, 在 Q_0 值小于 3000 时, 耦合电容的大小随 Q_0 值的变化很快, 但是在 Q_0 值大于 3000 以后, 则耦合电容的大小和 Q_0 值的大小几乎无关. 这就说明, 只有在模型腔体的 Q_0 值较高时 (大于 3000), 根据模型腔体设计的耦合系统对实际腔体才适用, 否则必须考虑 Q_0 值对耦合系统的影响.

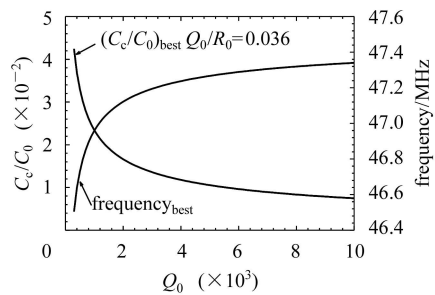


图 2 耦合电容大小及频率偏移量和空载 Q 值的关系

4 电容耦合系统设计的一般方法

根据公式(11), 可以总结出如下的电容耦合系统设计的一般方法:

- 1) 先通过数值模拟得到腔体的 Q_0/R , 然后根据公式(6)和(7)得到耦合电容和 Q_0 值的关系曲线;
- 2) 得到腔体的空载 Q 值. 一般来说, 在腔体没有加工出来前是很难得到腔体空载 Q 值的确切值的. 但

是可以通过模型腔体的测量或数值模拟得到 Q_0 值的大概范围, 如果在此范围内, 耦合电容的大小随 Q_0 值的变化不是很明显, 则就可以利用测量或计算值进行耦合设计, 否则必须考虑 Q_0 值的变化对耦合电容的影响, 设计时保留一定的余地;

3) 通过数值计算得到耦合电容的具体尺寸. 由于得到的是耦合电容和腔体等效电容的比值, 在耦合电容相对于腔体等效电容很小的情况下 (对高频腔体, 此条件几乎全部满足), 由于耦合电容的引入, 腔体谐振频率的相对变化和耦合电容与腔体等效电容的比值满足

$$\Delta C/C_0 = -2\Delta f/f_0 = C_c/C_0, \quad (15)$$

所以从频率的改变量就可以得到对应的耦合电容的大小.

5 应用实例

图3所示是一台质子回旋加速器的模型腔体. 为了降低腔体的高度, 内杆采用了螺旋线结构, 但是为此付出的代价是腔体的 Q 值较低. 为了分析其耦合系统, 首先测量了腔体的空载 Q 值. 采用驻波系数法^[2], 利用网络分析仪得到空载 Q 值. 但是由于并联阻抗的测量比较困难, 又利用 HFSS (High Frequency System Simulation) 程序, 通过选择合适的铜的电导率, 使计算得到的 Q_0 值和测量得到的 Q_0 值尽量一致, 在此条件下计算得到腔体的空腔谐振频率和腔体的并联阻抗. 所得结果如表1所示.

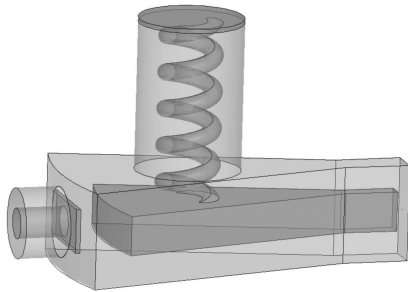


图3 质子回旋加速器模型腔体

表1 模型腔体主要参数

frequency/MHz	Q factor	shunt impedance/k Ω
47.52	476.03	13.36

模型腔耦合电容的电容板尺寸为 $60\text{mm} \times 80\text{mm}$, 通过数值模拟得到了耦合电容不同位置时对应的耦合电容和腔体等效电容的比值, 结果如图4所示. 利用表1中的参数, 由公式(11)可以得到理想匹配所需要

的耦合电容和腔体等效电容的比值为 0.034, 由图4可得, 这时所对应的耦合电容板间距为 16mm . 为了比较, 利用公式(13)和(14)计算了耦合电容板间距为 10, 16, 30 (对应的 $C_c/C_0=0.05, 0.034, 0.018$) 时反射系数幅度及相角随频率的变化曲线, 结果如图5和图6所示. 图中同时给出了测量曲线及数值模拟曲线.

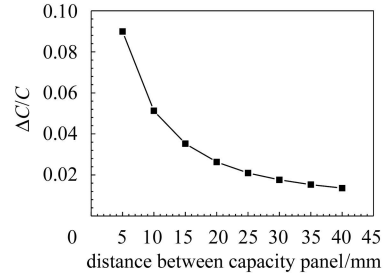


图4 耦合电容不同位置对应的耦合电容与腔体等效电容的比值

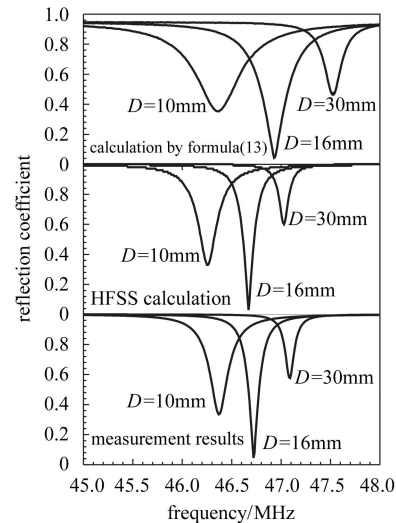


图5 反射系数幅度随频率变化

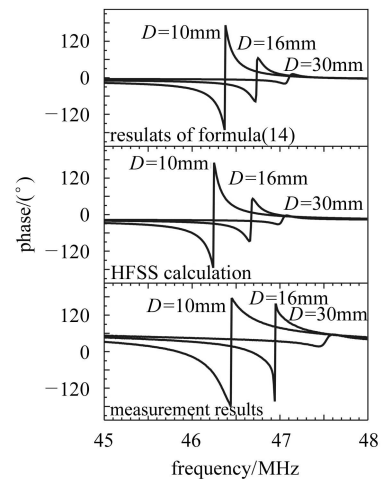


图6 反射系数相角随频率的变化

从图5和图6可以看到, 公式(13)和(14)的计算结果和测量结果及数值模拟结果符合得较好, 计算所得耦合电容大小确实可以实现近似理想匹配. 至于计算得到的工作频率相对于空腔谐振频率偏移量和测量及数值模拟结果的较大差别, 主要是由于模型腔的 Q 值很低. 由图2可见, 很小的 Q 值的误差(测量误差)就可能引起较大的频率偏移量的误差. 对于常规的高频腔体, 由于其 Q 值较大, 所以应该不会有较大误差. 总之, 通过上述结果可以确信, 从图1的等效电路得到的结果完全可以指导我们对耦合系统的设计.

6 结论

通过上述分析, 可以得到以下结论:

1) 从等效电路(如图1)出发所得结果和测量及数值模拟结果符合得较好, 这说明等效电路基本正确反映了电容耦合系统的本质.

2) 由公式(11)所得耦合电容的大小基本可以实现理想匹配.

3) 对于相同类型的腔体, 在耦合系统设计中必须考虑空载 Q 值的影响, 只有对于空载 Q 值较大(>3000)的系统, 这种影响才可以忽略.

参考文献(References)

- 1 LI Zhi-Hui, TANG Jing-Yu. High Power Laser and Particle Beams, 2000, **12**(1): 107 (in Chinese)
(李智慧, 唐靖宇. 强激光与粒子束, 2000, **12**(1): 107)
- 2 ZHOU Qing-Yi. Microwave Measurement Technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1964. 215 (in Chinese)
(周清一. 微波测量技术. 北京: 国防工业出版社, 1964. 215)

Study of the Capacitance Coupling in Accelerators^{*}

LI Zhi-Hui¹⁾

(Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract The relation between the input impedance and the characteristic parameters of a cavity, such as the resonance frequency, shunt impedance and the quality factor, has been obtained based on the equivalent circuit of the cavity and the coupling system. Using the matching condition, the ratio of coupling capacitance to the equivalent capacitance of the cavity can be acquired as a function of the characteristic parameters of the cavity, the value of the coupling capacitance can be obtained with a help of a numerical simulation and the perturbation theory, and then the perfect matching between the cavity and the transmission line can be procured. The application of these results on a model cavity is presented too.

Key words capacitance coupling, match, reflection coefficient

Received 1 November 2005

^{*}Supported by HIRFL-CSR Scientific Project

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