

等梯度行波加速管耦合器的调配方法

郭兴坤, 马雁云, 王修龙

(中国原子能科学研究院 核技术应用研究所, 北京 102413)

摘要: 本文在已有的等阻抗行波加速管耦合器调配方法的基础上, 根据耦合腔链的等效电路模型, 推导了实验调配等梯度加速管耦合器的方法, 给出定量计算该结构耦合器耦合度 β 的公式, 并通过 CST 模拟计算和实验调配验证了该方法和公式的正确性。

关键词: 耦合器; 变频法; 等效电路; 导纳圆图

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2013)02-0181-04

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. 02. 0181

Coupler Tuning for Constant Gradient Travelling Wave Accelerating Structures

GUO Xing-kun, MA Yan-yun, WANG Xiu-long

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-17, Beijing 102413, China)

Abstract: The method of the coupler tuning for the constant gradient traveling wave accelerating structure was described and the formula of coupling coefficient β was deduced on the basis of analyzing the existing methods for the constant impedance traveling wave accelerating structures and coupling-cavity chain equivalent circuits. The method and formula were validated by the simulation result by CST and experiment data.

Key words: coupler; frequency conversion method; equivalent circuit; admittance chart

耦合器是加速结构中最重要的组成部分之一, 微波功率是否能以最小的反射馈入加速结构中, 并将剩余功率通过输出耦合器耦合到吸收负载, 以及整个加速结构是否能工作在设计的模式下, 均取决于耦合器是否与加速腔链达到最佳匹配。

目前, 对于等阻抗加速管耦合器的调配方法有很多, 但大多不适合等梯度非均匀加速管的调配。例如, 三频率法、移动负载法均建立在

耦合器所连接的加速腔链为等阻抗前提下, 不再适用于等梯度的加速腔链。

变频法是在移动负载法的基础上推导出来的, 其测量依据是整个加速结构的色散特性, 适用于等梯度等非均匀腔链所连接的耦合器的调配。本工作通过对等效电路模型的分析, 推导等梯度加速管链耦合器耦合度 β 的计算公式, 并通过 CST 模拟和实验测量证明该方法对于等梯度结构的适用性。

1 移动负载法与变频法简介^[1]

移动负载法理论基础是长线理论,前提假设是耦合器所连接的加速腔链为均匀无损的,其测量原理如图 1 所示。加速管是以 D 为周期的周期性结构,耦合器的性能由它的散射矩阵 S 决定,耦合器可等效为无损互易网络。

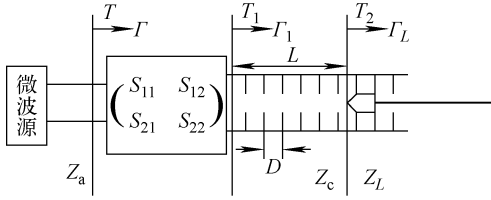


图 1 移动负载法测量原理图

Fig. 1 Schematic of moving load method

图中: Z_a 为矩形波导的特性阻抗; Z_c 为盘荷波导的特性阻抗; Z_L 为负载或其他终端元件的阻抗; Γ 为自参考面 T 视入耦合器的输入反射系数; Γ_1 为从参考面 T_1 视入盘荷波导方向的反射系数; Γ_L 为从参考面 T_2 视入负载的反射系数。

将有一定反射系数的任意负载在加速管内移动,测量其反射系数或驻波系数。当负载插入加速管时,以步长 D 移动,则 Γ_L 为常数, Γ 仅改变相角,在导纳图上 Γ 为一圆。根据 Γ 圆可求出耦合器的 S 参数 S_{11} ,通过 S_{11} 在导纳圆图中的位置来判断耦合度和频偏,判断依据为:

$$\text{当: } \begin{cases} \beta > 1 \text{ 时, } S_{11} \text{ 在 } g = 1 \text{ 的圆外 } (g < 1) \\ \beta < 1 \text{ 时, } S_{11} \text{ 在 } g = 1 \text{ 的圆内 } (g > 1) \end{cases}$$

$$\text{当: } \begin{cases} \Delta f > 0 \text{ 时, } S_{11} \text{ 位于导纳圆图的下半部分,} \\ \quad \text{耦合器频率高于工作频率} \\ \Delta f < 0 \text{ 时, } S_{11} \text{ 位于导纳圆图的上半部分,} \\ \quad \text{耦合器频率低于工作频率} \end{cases}$$

移动负载法是通过以结构的周期长度为步长移动负载改变 L 来改变 Γ_1 的相角,但前提是耦合器所连加速腔链为等阻抗结构;而在移动负载法基础上提出的变频点法(图 2)则保持 L 不变,利用加速管的色散特性,改变频率使导波波长 λ_g 及群速 v_g 发生变化,同样能使 Γ_1 的相角改变 360° 。一般对于长管, Δf 在小的频率范围内即可使 Γ_1 的相角改变 2π ,耦合器的散射参量因频率变化小,对 Γ 的影响很小,可近似为常数。所以由变频移相所得的 Γ_1 在导纳圆图上近似为圆,变换得到的 Γ 在导纳圆图上也近似为一圆。

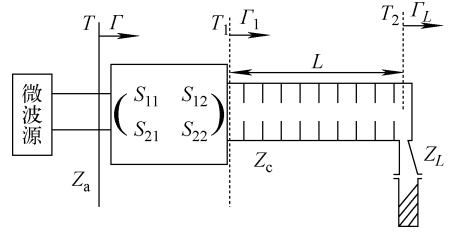


图 2 变频法测量原理图

Fig. 2 Schematic of frequency conversion method

输入耦合器的驻波系数 ρ_c 由式(1)计算:

$$\rho_c = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} = \begin{cases} \sqrt{\rho_{\max}\rho_{\min}} (\Gamma \text{ 圆不包含 } O \text{ 点}) \\ \sqrt{\rho_{\max}/\rho_{\min}} (\Gamma \text{ 圆包含 } O \text{ 点}) \end{cases} \quad (1)$$

同样求出 S_{11} 来判断耦合度与频偏,判断方法与移动负载法相同。这种方法不要求耦合器所连接的加速腔链必须是等阻抗,只要为调配好的无损腔链即可,可应用到等梯度加速结构的调配。

2 变频法的进一步推导

为能验证变频法对于等梯度结构的适用性并定量计算耦合度 β ,对变频点法的实验结构进行等效电路分析,推导根据 S_{11} 计算耦合度 β 的公式。

2.1 等效电路模型

盘荷波导加速管腔链可等效成无损双口级联网络,当腔链已调配好时,其特性阻抗在工作模式下 $Z_c(\omega_0)$ 为一实数(对于等阻抗和等梯度的加速腔链均成立),并为工作频率 ω_0 的函数,对于不同的工作模式,特性阻抗不同。耦合器上的矩形波导可等效为特性阻抗为 Z_c 的均匀传输线,耦合腔与矩形波导间的耦合可假设为无损耦合,即在特定的失谐面可等效为 $1:n$ 的理想变压器^[2]。在上述假设的前提下,带耦合器的等梯度加速腔链的等效电路模型如图 3 所示。

图中: L_1 和 C_1 为耦合器的等效电感和电容; C 为耦合腔与加速腔链间的耦合电容(b 参考面位于耦合腔与加速腔链间盘片的中心位置)。

2.2 匹配条件的推导

如图 3 所示,从 b 参考面向输出端的输入阻抗应为 $Z_b = Z_c(\omega_0)$,则从参考面 a 向输出端的输入阻抗 Z_a 的表达式^[3]为:

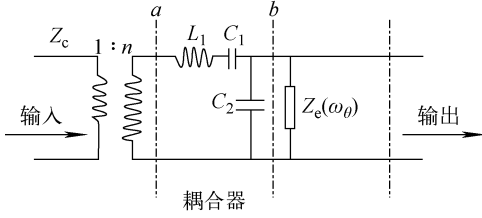


图3 变频法等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit of frequency conversion method

$$Z_a = j\omega_0 L_1 + \frac{1}{j\omega_0 C_1} + \frac{2}{j\omega C} // Z_b \quad (2)$$

化简后可得:

$$Z_a = j\left(\omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} - \frac{2\omega_0 C Z_b^2}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2}\right) + \frac{4Z_b}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2} \quad (3)$$

令 $Z_j = \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} - \frac{2\omega_0 C Z_b^2}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2}$, $Z_r =$

$\frac{4Z_b}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2}$, 则有:

$$Z_a = jZ_j + Z_r \quad (4)$$

当耦合器达到匹配时其归一化阻抗(z_a)应满足^[4]:

$$z_a = \frac{Z_a}{n^2 Z_c} = 1 + j \cdot 0 \quad (5)$$

即可得到:

$$\begin{cases} n^2 Z_c = \frac{4Z_b}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2} \\ \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_1} - \frac{\omega_0 C Z_b^2}{4 - (\omega_0 C Z_b)^2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当耦合器在工作模式下匹配时,无论是等阻抗还是等梯度情况该条件均同时成立,因式中的 Z_b 是整管的特性阻抗,只取决于该管的整体色散特性,所以变频法可应用到等梯度结构的调配。

2.3 利用 S_{11} 推导求解耦合度 β 的公式

根据微波理论可知,输入耦合器的耦合度 β 可表示为:

$$\beta = \frac{n^2}{Z_r(\omega_0)} \quad (7)$$

利用变频法求出的 S_{11} 即为图 2 中耦合腔后所接的加速结构匹配时耦合器的反射系数 Γ , Γ 的表达式为:

$$\Gamma = S_{11} = \frac{z_a - 1}{z_a + 1} \quad (8)$$

将式(4)、(7)带入式(8),可得如下表达式:

$$S_{11} = \frac{\frac{jZ_j(\omega_0)}{Z_r(\omega_0)} + 1 - \beta}{\frac{jZ_j(\omega_0)}{Z_r(\omega_0)} + 1 + \beta} = |S_{11}| (\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (9)$$

因 S_{11} 在导纳圆图中与 smith 圆图原点与 Γ 圆圆心共线,则可由此求出 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$ 。

化简上式可得:

$$\begin{cases} \frac{Z_j(\omega_0)}{Z_r(\omega_0)} = \frac{|S_{11}| (1 + \beta) \sin \varphi}{1 - |S_{11}| \cos \varphi} \\ \beta = \frac{1 - 2 |S_{11}| \cos \varphi + |S_{11}|^2}{1 - |S_{11}|^2} \end{cases} \quad (10)$$

3 CST 模拟调配

模拟调配主要是在 CST microwave studio 平台上对变频法的调配方法进行模拟,以验证理论推导的正确性,所建模型如图 4 所示。

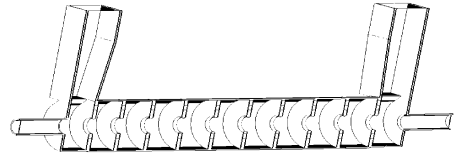


图4 CST 模拟调配加速结构模型

Fig. 4 Structural model on CST microwave studio

对耦合器耦合孔宽度 k 和耦合腔半径 r 进行调节时,模拟计算得到的耦合度及 S_{11} 在 smith 圆图中纵坐标(因判断频偏仅取决于纵坐标)的变化如图 5 所示。

从图 5a 可看出,采用变频法调配输入耦合孔时,耦合度随耦合孔宽度的增大近似为线性; S_{11} 的纵坐标变大,即频率降低。从图 5b 可看出,随耦合腔半径的增大, S_{11} 的纵坐标随之变大,即频率降低,耦合度逐渐减小。采用此方法分别调配输入、输出耦合器至耦合度接近于 1, S_{11} 的纵坐标接近于 0 时,得到加速腔链整体的传输性能参数为: $S_{11, \min} = -34.7986 \text{ dB}$ ($f = 2854.7 \text{ MHz}$)、输入电压驻波比 $VSWR = 1.037$ 、带宽 $\Delta f \approx 3.7 \text{ MHz}$,这一结果说明了变频法可实现对等梯度加速结构耦合器的精确调配,同时证明了理论推导的正确性。

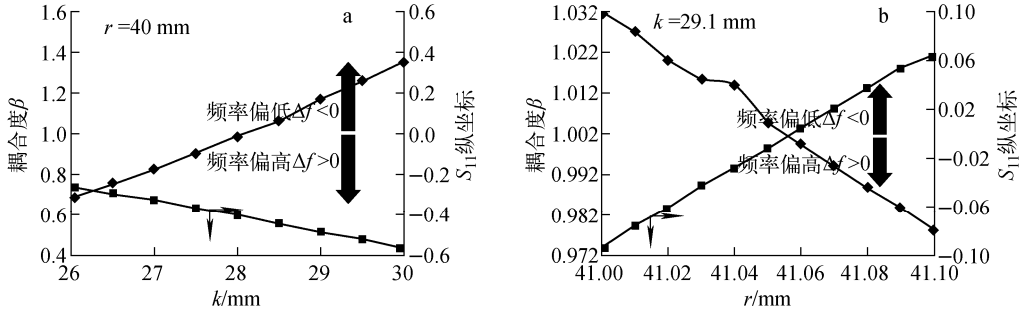


图5 调节耦合宽度(a)及调节耦合腔半径(b)时 S_{11} 纵坐标及耦合度的变化

Fig. 5 Changes of S_{11} ' ordinate and β while adjusting width of coupling aperture (a) and radius of coupling-cavity (b)

4 实验调配

为了通过实验验证变频法的正确性和实用性,加工了一段实验等梯度腔链,如图6所示。

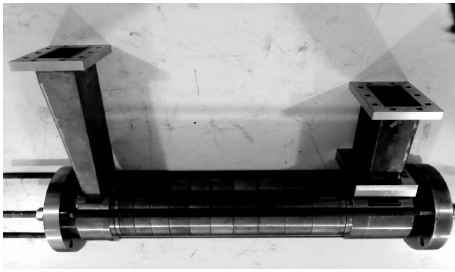


图6 采用变频法调配的实验腔链
Fig. 6 Cavity chain for experiment of frequency conversion method

对实验腔链的输入输出耦合器分别进行了变频法调配,得到的实验数据和模拟结果的变化规律相同,从实验的角度证明了变频法适用于非均匀腔链所配耦合器的调配。通过变频法将输入输出耦合器调至接近匹配位置时,再利用整管的 VSWR 进行微调。最后获得 1 组匹配尺寸,使整管的传输性能参数在工作频率 2 855.4 MHz(真空条件下为 2 856 MHz)下达

到 $VSWR=1.04$ 、传输效率 $S_{21}=-1.3$ dB(包括两个耦合器的衰减 -0.3×2 dB),与 CST 模拟结果基本一致。

5 结论

通过理论推导,给出了等梯度加速结构的调配方法并推导出该方法耦合度 β 的计算公式。通过 CST 程序模拟和实验调配,验证了调配方法和公式的正确性,成功调配出 1 段等梯度行波加速腔链。

参考文献:

- [1] 崔宇鹏. 加速管调配的矢网测试及分析系统[D]. 北京:清华大学,1999.
- [2] 郑曙昕,崔宇鹏,陈怀璧,等. 三频率法测量耦合器定量分析[J]. 高能物理与核物理,2001,25(1):61-68.
ZHENG Shuxin, CUI Yupeng, CHEN Huaibi, et al. Quantitative analysis of coupler tuning[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2001, 25(1): 61-68(in Chinese).
- [3] 顾茂章,张克潜. 微波技术[M]. 北京:清华大学出版社,1989.
- [4] 姚充国. 电子直线加速器[M]. 北京:科学出版社,1986.