

# 微波电子枪外回路耦合度计算与实验研究\*

边晓浩<sup>1</sup> 陈怀璧<sup>1</sup> 郑曙昕<sup>1</sup> Derun Li<sup>2</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (LBNL, One Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA)

**摘要** 在热阴极微波电子枪的研制中, 为设计微波腔链与波导的耦合孔, 应用 Derun Li 等提出的“能量方法”进行模拟计算. 使用 MAFIA 计算微波电子枪第 3 腔与外回路馈电波导之间的耦合度, 从而设计连接波导与腔链的耦合孔, 使两者之间的耦合度满足需要. 该方法的计算结果与实验测量值的差别在 10%—30% 之间, 满足实际加工要求. 说明其对于驻波加速腔链与外回路耦合的设计计算是相当有效的.

**关键词** 耦合度 耦合器 微波电子枪 MAFIA

## 1 引言

目前, 微波电子枪作为一种性能良好的电子注入器, 得到了广泛的应用. 其中热阴极微波电子枪结构比较简单、紧凑, 建造成本低, 发射亮度也较高, 工作稳定. 清华大学加速器实验室朱玲等考虑减小电子反轰, 研制了一种新型的轴耦合热阴极微波电子枪<sup>[1]</sup>. 该电子枪的微波腔链由 3 个腔构成, 腔链工作在驻波模式.

该微波电子枪的微波功率由连接在腔链上的矩形波导馈入, 结构如图 1. 如果驻波腔链工作频率和微波功率源频率一致以及腔链与波导之间的耦合度调至合适, 则微波功率源可以有效地通过馈电波导馈入驻波腔链. 只有这样腔链才能正常工作, 所以, 耦合孔的设计十分关键.



图 1 微波电子枪第 3 腔与馈电波导结构示意图

耦合度计算一般采用数值模拟方法, 可以采用频域计算方法或者时域计算方法. 频域里, KROLL 和 YU 根据 SLATER 的理论提出了可以应用于计算机模拟计算的方法<sup>[2]</sup>. 该方法对于低  $Q$ 、高  $\beta$  的腔型比较有效. 时域里, 可以采用稳态的方法或暂态的方法. 稳

态的方法是记录系统整个的衰减过程求得耦合度. 稳态方法适用于建场时间较短的行波结构, 或者耦合很强,  $\beta$  很高的驻波结构; 暂态方法是记录衰减过程的若干个时刻的场分布, 从而求得耦合度. 暂态方法可以计算各种情况下的耦合度.

在暂态方法中, Derun Li 等人提出一套应用 MAFIA 的计算方法——能量方法<sup>[3]</sup>. 该方法模拟谐振腔与波导中的场的时域信号, 同时充分利用 MAFIA 程序 T, P 等模块的内置功能, 可以比较准确地计算高  $Q$  的腔型. 由于我们要设计的微波电子枪的第 3 腔  $Q_L$  很高, 最高达到了  $1.0 \times 10^4$ , 并且考虑到“能量方法”较之 KROLL-YU 方法, 计算步骤少, 计算效率高. 所以本文采用“能量方法”设计微波电子腔的耦合孔.

## 2 能量方法及其应用

在谐振耦合器腔内建场的过程中, 假设下述关系在任一瞬时成立:

$$Q_0 = \omega_0 \frac{U(t)}{P_\omega(t)}, \quad Q_{\text{ext}} = \omega_0 \frac{U(t)}{P_{\text{out}}(t)}, \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  是系统固有谐振角频率,  $U(t)$  和  $P_\omega(t)$  分别是  $t$  时刻一个谐振周期内的平均储能和功耗,  $P_{\text{out}}(t)$  是  $t$  时刻一个谐振周期内从波导端口流出的微波功率, 也即通过耦合孔从腔内流出的微波功率. 首先通过时域

2005 - 02 - 06 收稿

\* 国家自然科学基金(10135040), 北京市科技计划项目(D0404004040221)资助

模拟计算系统的谐振频率  $f_0$ , 然后利用  $f_0$  再次进行时域模拟, 求得系统的耦合度  $\beta$ .

## 2.1 计算系统的谐振频率 $f_0$

本文中的谐振腔为盘荷波导管链的一个单元, 工作在 TM010 模式下, 因此可以估算系统的固有谐振频率. 在 MAFIA 的 T 模块中选择一个有一定带宽的脉冲信号源, 中心频率设在估计的系统固有谐振频率, 信号源的振动方向为腔的纵向. 该信号源会在腔内建立电磁场, 产生各种模式的场, 当其余模式全部衰减后, 腔内将只剩下频率等于系统固有频率的 TM010 模式并逐渐衰减. 利用 T 模块的监视器 (monitor) 功能, 在腔内距离驱动点合适的位置记录产生的时变电场, 记录的电场信号图如图 2.

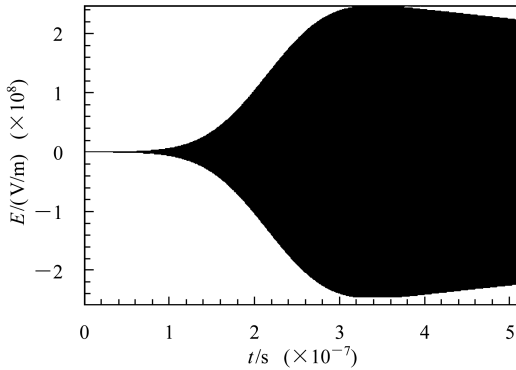


图 2 脉冲信号源在腔内激励起电场信号

计算假定为无损, 所以必须设定腔壁、波导材料为理想导体, 腔内为真空. 当振荡时间足够长, 驱动源消失后, 腔中电磁场将以固有时间常数  $\tau = \frac{2Q_L}{\omega_0}$  衰减.  $Q_L$  为系统的有载品质因数, 且

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{\text{ext}}}, \quad (2)$$

对于本文中的高  $Q$  值腔, 工作频率在 2856 MHz 附近,  $Q_L > 5000$ , 所以衰减时间  $\tau > 0.25 \mu\text{s}$ , 相当长, 从而计算所用 CPU 时间相应也很长, 所以用达到稳态寻找衰减时间这种方法计算  $Q$  值是不现实的. 因此需要采用暂态方法.

可以使用 MAFIA 的后处理 P 模块中的快速傅立叶变换 (FFT) 从记录的时域电场信号来变换出系统工作频率. 或者以我们的计算实践来说, 从记录的电场信号图上最后 20 个周期来读出信号的平均周期, 相对准确.

## 2.2 计算耦合系数 $\beta$

在 T 模块中, 将脉冲信号设置为频率为  $f_0$  的时谐

函数,  $f_0$  为前一步骤中求得的系统工作频率. 这样将在谐振腔内激励起固有模式 TM010 模的电磁场, 并有电磁波通过耦合孔进入波导.

为了计算平均储能和  $t_0$  时刻的功耗, 设定

$$\Delta t = \frac{1}{4f_{\text{drv}}}, \quad (3)$$

其中  $f_{\text{drv}} = \frac{\omega_0}{2\pi}$  为驱动频率,  $\omega_0$  是谐振角频. 在 T 模块中, 监测器功能可以记录指定时刻、指定几何体积内的电磁场分布. 除在与上相同位置记录时变电场信号之外, 还需使用监视器记录系统在  $t_0$ ,  $t_0 \pm \Delta t$  时刻的电磁场分布.  $t_0$  选在时间足够长, 以至于腔内驱动源消失或者对于总储能的相对能量贡献可以忽略的时刻 (这时刻可以从前面记录的电场信号图得出).

在脉冲源的驱动下, 电磁场逐渐建立起来, 有:

$$\Phi(t) = \Phi_{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \sin(\omega_0 t + \theta_0), \quad (4)$$

$\Phi(t)$  表示  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  或  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ ,  $\Phi_{\infty}$  是稳定状态场的振幅.  $\theta_0$  是初始相位. 对于高  $Q_L$  系统, 达到稳定状态场振幅  $\Phi_{\infty}$  的时间很长, 无法等到系统完全稳定再计算  $\beta$ . Derun Li 发现利用  $t_0$  和  $t_0 \pm \Delta t$  时刻记录的三维电磁场, 可以方便地计算出  $Q_0$  和  $Q_{\text{ext}}$ .

当  $\frac{t}{\tau} \ll 1$  时, 由方程 (4) 得:  $\Phi(t) \approx \frac{t}{\tau} \Phi_{\infty} \sin(\omega_0 t + \theta_0)$ . 所以场的建立近似为线性, 建立的电场信号如图 3 所示.

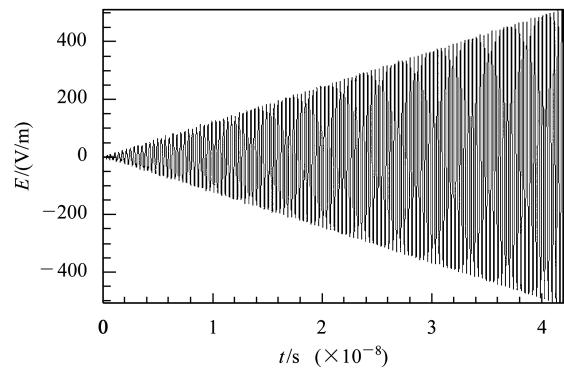


图 3 谐振腔内近似线性地建立起电场

如前指出,  $t_0$  时刻必须选在驱动源基本消失之后. 通常需要在近 30 次谐振周期之后选取  $t_0$  进行计算. 如本文取  $t_0 = 0.02 \mu\text{s}$ . 为计算  $U(t)$ ,  $P_{\omega}(t)$  和  $P_{\text{out}}(t)$ , 需要使用 MAFIA 的 P 模块. P 模块中的能量计算和功耗计算都与相位有关. 不过, 当取  $\Delta t = \frac{1}{4f_{\text{drv}}}$  之后, 这

些由相位决定的项可以自动取消. 因为

$$\begin{aligned} \Phi^2(t_0) + \Phi^2(t_0 \pm \Delta t) &= \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \sin^2(\omega_0 t_0 + \theta_0) + \\ &\left(\frac{t_0 \pm \Delta t}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \sin^2[\omega_0(t_0 \pm \Delta t) + \theta_0] = \\ &\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \sin^2(\omega_0 t_0 + \theta_0) + \\ &\left(\frac{t_0 \pm \Delta t}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \sin^2(\omega_0 t_0 \pm \frac{\pi}{2} + \theta_0) = \\ &\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \sin^2(\omega_0 t_0 + \theta_0) + \\ &\left(\frac{t_0 \pm \Delta t}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 \cos^2(\omega_0 t_0 + \theta_0) \approx \\ &\left(\frac{t_0}{\tau}\right)^2 \Phi_\infty^2 = |\Phi(t_0)|^2 \end{aligned}$$

所以,  $t_0$  时刻的储能为

$$U_\Phi(t_0) = \frac{\alpha}{2} \oint_V \{|\Phi(t_0)|^2\} dv \approx \frac{\alpha}{2} \oint_V \{\Phi^2(t_0) + \Phi^2(t_0 \pm \Delta t)\} dv, \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \begin{cases} \varepsilon_0, & \text{当 } \Phi = \mathbf{E} \text{ 时} \\ \frac{1}{\mu_0}, & \text{当 } \Phi = \mathbf{B} \text{ 时} \end{cases}$$

类似地计算功耗得(此时应指定腔壁材料为纯铜)

$$P_\omega(t_0) \approx \frac{R_s}{2} \oint_S \{H^2(t_0) + H^2(t_0 \pm \Delta t)\} ds. \quad (6)$$

P 模块中有专门计算储能的方法, 可以计算 T 模块中监视器记录的  $t_0$  和  $t_0 \pm \Delta t$  时刻限定体积内电场的总能量  $U_E(t_0)$  和磁场的总能量  $U_B(t_0)$ , 完成以上公式的算法.

因此得无载品质因数  $Q_0$ :

$$Q_0 \approx \omega_0 \frac{U_E(t_0) + U_B(t_0)}{P_\omega(t_0)}. \quad (7)$$

群速  $v_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_{drv}}\right)^2}$ ;  $f_c$  是波导截止频率, 通过 MAFIA 本征值计算模块 E 模块计算波导传输模式 TE<sub>10</sub> 模得出. 储能计算时选取波导的长度为  $d$ . 在 T 模块中记录波导  $d$  长度内的电磁场分布, 并在 P 模块中计算总储能, 从而可得到传播方向单位长度的储能,

$$W_{wg}(t_0) = \frac{1}{d} [U_E(t_0) + U_B(t_0)]_d. \quad (8)$$

波导内的能量密度  $W_{wg}$ , 与波导中电磁场的群速  $v_g$  之积, 即为从腔内流出的功率  $P_{out}(t_0)$ ,

$$P_{out}(t_0) = v_g W_{wg}(t_0). \quad (9)$$

$\beta$  可直接用(1)式求出:

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} = \frac{P_{out}(t_0)}{P_\omega(t_0)}.$$

实际计算过程也可只进行第一次时域计算, 腔内电磁场稳定之后, 在求系统谐振频率的同时记录  $t_0$  和  $t_0 \pm \Delta t$  时刻的三维电磁场, 同样可以应用这些场求得  $\beta$ , 这样基本可以节省一半计算时间.

### 3 模拟计算结果与实验结果

实验时将谐振腔两边设置盲板使端面成为短路面, 采用微波网络分析仪测量波导端口的  $\rho$ - $f$  曲线, 从而得到耦合谐振腔的耦合度  $\beta$ .

将耦合孔的厚度每减少 1mm, 进行一次实验. 实验结果与计算结果得到的耦合度  $\beta$  与耦合孔厚度在同一坐标系内的关系曲线, 如图 4.

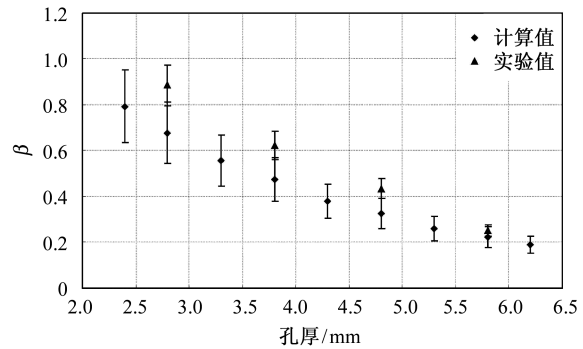


图 4 耦合度  $\beta$  与耦合孔厚度关系曲线

分析图 4 曲线可以得出, 当孔的横截面大小一定时, 耦合系数  $\beta$  随耦合孔厚度的增加指数衰减. 说明  $\beta$  对耦合孔厚度相当敏感, 实际加工时应特别注意这一点.

在孔横截面大小为 9mm×19.6mm 情况下, 改变腔直径大小. 因为腔的中心轴固定, 所以相应地耦合孔厚度变小, 计算耦合度, 关系曲线如图 5.

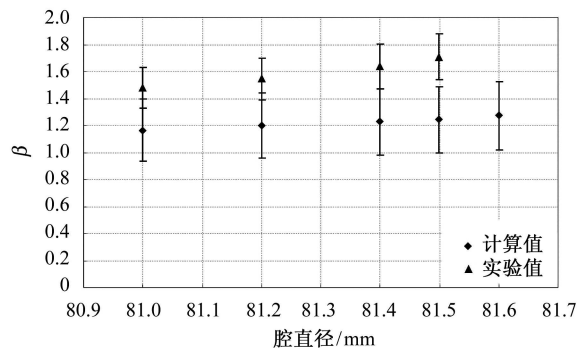


图 5 耦合度  $\beta$  与腔直径关系曲线

图5也表明耦合系数 $\beta$ 随耦合孔厚度的增加指数衰减. 计算结果衰减较缓, 可能是因为采用的网格划分较大, 难以反映出实际尺寸的变化, 导致计算结果之间相当接近.

在图4, 图5的曲线中, 实验产生的测量误差主要是由耦合孔加工公差和微波网络分析仪的误差引起的. 耦合孔加工公差为0.03mm, 引起的测量误差在2%以内. 微波网络分析仪由方向性误差, 泄漏误差等引起的系统误差可以通过校准基本消除, 由信号噪声引起的随机误差, 由信号源、同轴接头和标准件引起的固有误差小于10%. 所以 $\beta$ 的总的实验测量误差约为10%.

在图4, 图5的曲线中, MAFIA的计算误差主要是由于不同的网格划分所引起的, 当网格边长不大于0.7mm时,  $\beta$ 的计算结果即收敛在20%以内.

实验值与计算值的偏差在10%—30%之间, 这是由实验误差和计算误差共同引起的. 以上误差, 尤其是网格划分产生的误差, 需要在进一步的计算实践中去提高, 可以从提高网格密度, 使用双精度计算等方

面去改善. 目前来说, 以上模拟计算结果已比较准确, 满足实际加工要求.

## 4 结论

当耦合孔厚度为2.1mm, 横截面为9mm × 20.12mm时, 模拟计算结果系统耦合度 $\beta = 1.4$ . 相应的实验结果为 $\beta = 1.9$ , 达到了动力学设计要求的微波电子枪单腔耦合度. 模拟计算结果与实验结果的偏差为26%, 基本满足实际加工的需要. 因此, 本文实现了应用“能量方法”, 通过MAFIA的数值模拟计算, 设计微波电子枪耦合器耦合孔的几何参数这样一个过程.

实验结果与计算结果表明, “能量方法”是计算微波电子枪腔链与外波导回路耦合的一个有效的方法. 该方法计算结果相对比较准确, 计算效率较高. 使用它指导耦合孔的设计, 可以大大缩减实际的加工周期, 提高加工效率. 它还可以应用到其他驻波腔链与外回路耦合的模拟计算中.

## 参考文献(References)

- 1 ZHU Ling et al. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(8): 1033(in Chinese)
- 2 Kroll N, YU D. Particle Accelerators, 1990, **34**: 231—250
- 3 LI De-Run et al. Calculations of External Coupling to a Single Cell Rf Cavity. Proceeding of LINAC 1998(Th4093)

(朱玲等. 强激光与粒子束, 2004, **16**(8): 1033)

# Simulation and Experiment Investigation of the Coupling Factor for Waveguide Loaded Microwave Electronic Gun<sup>\*</sup>

BIAN Xiao-Hao<sup>1</sup> CHEN Huai-Bi<sup>1</sup> ZHENG Shu-Xin<sup>1</sup> Derun Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>2</sup> (LBNL, One Cyclotron Road, Berkeley, CA 94720, USA)

**Abstract** To design the coupler of one kind of thermionic cathode microwave electronic gun, we apply the “energy method”, which calculates the coupler factor between the waveguide and cavities of the electronic gun. So we can design the geometry size of the coupling iris. MAFIA code is used. Comparing with the experiment results, the simulating results is in agreement with measurement about 10%—30% deviation. “Energy method” is an efficient and simply method to calculate the coupler factor between cavities and waveguide.

**Key words** coupling factor, coupler, microwave electronic gun, MAFIA

Received 6 February 2005

<sup>\*</sup>Supported by NSFC(10135040) and Beijing Science and Technology Plan Project(D0404004040221)