

具有两节滤波器的宽带速调管输出段的数值模拟

王 勇 谢敬新

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

【摘要】本文采用边界元算法, 对具有两节滤波器的宽带大功率速调管输出段进行了数值模拟, 定量地给出了输出腔的频率、Q值以及滤波器各相关尺寸对频带特性的影响曲线。测试者可根据这些曲线的变化规律, 有的放矢地调整各种参数, 从而可大大地提高测试效率, 缩短制管周期。

【关键词】边界元法 滤波器输出段 频带特性曲线

1 引言

宽带大功率速调管是现代宽频带雷达的心脏。长期以来, 人们一直在致力于最大限度地扩展速调管频带的研究。由于速调管的带宽最终受到其输出段带宽的限制^[1], 因此, 研究速调管的输出方式和最大限度地展宽输出段的带宽成了速调管研究领域的一项重要课题。目前, 常用的速调管输出段形式主要有: 滤波器型输出段、重叠模双间隙输出段、双间隙滤波器型输出段和行波输出段等。在中国科学院电子学研究所研制的各类速调管中, 从L波段到X波段, 这些输出电路都有成功的应用^[2]。

然而, 速调管输出段的结构一般都很复杂, 影响输出阻抗—频带特性的参数很多, 因而冷测工作非常棘手。人们常常需要加工冷测模型, 花费大量的时间对诸多参数进行调整, 才可能得到满足要求的阻抗—频带曲线。这样, 不仅增加了测试工作量, 增加了制管成本, 还延长了制管的周期。

本文采用边界元算法, 对具有两节滤波器的宽带速调管输出段进行了详细的数值模拟。计算了其输出腔的频率、Q值以及滤波器各相关尺寸对频带特性的影响曲线。根据这些曲线, 测试者可方便地调整各种参数, 从而可极大地提高测试效率。

2 边界元理论

边界元法(BEM)是在经典积分方程和有限元法(FEM)基础上发展起来的解微分方程的数值方法。该方法的基本思想是通过微分方程的基本解, 将微分方程化为边界积分方程, 用有限元离散化思想把区域的边界离散化, 再用配制法或伽辽金法求积分方程的近似解。与有限元法相比较, 边界元法有两个明显的优点: 1) 可使求解问题的维数降低一维; 2) 能够方便地处理无界区域问题。

考虑如图1所示的二维开放谐振系统, 设TE₁₀波从波导右端入射, 则在区域Ω内, 电场强度的z向分量u(x,y)满足二维标量的Helmholtz方程:

$$\nabla^2 u + k^2 u = 0 \quad (1)$$

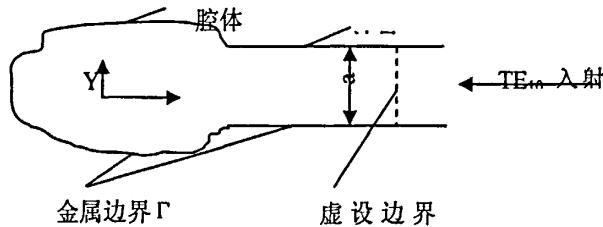


图 1. 二维开放谐振系统示意图

其中, k 为自由空间的波矢, 选取二维 Helmholtz 方程的基本解 u^* 为权函数, 对 (1) 式应用加权余量法, 可得到如下的边界元积分方程:

$$C_i u_i + \int_{\Gamma} (q^* + j\beta u^*) u d\Gamma = \int_{\Gamma} u^* q d\Gamma + \int_{\Gamma} 2j\beta u^* u^{in} d\Gamma \quad (2)$$

其中 $q = \frac{\partial u}{\partial n}$, $u^* = \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(kr)$, $q^* = \frac{\partial u}{\partial n} = \frac{jk}{4} H_1^{(2)}(kr) \cos \alpha$, $j = \sqrt{-1}$, r 为

场点到源点的距离, α 为 r 与边界法向 \vec{n} 的夹角, β 为入射波的传播常数, u^{in} 为入射波电场强度的 z 向分量, C_i 为一与节点 i 有关的系数, u_i 为区域内任一点 i 的电场强度。

将边界划分为 N 个线性单元, 采用线形等参边界元对 (2) 式进行离散, 可得到一个以边界上的 u 和 q 为未知数的 $N \times N$ 阶矩阵方程。求解该矩阵方程可以得到边界上的 $\{u\}$ 和 $\{q\}$, 代入离散方程后, 则可得到区域内任一点 i 对应于某一入射频率的电场强度。如果改变入射频率, 则可得到腔体内某一点处电场强度的平方随频率的变化曲线 (频带曲线)。

基于边界元理论, 我们编制了通用的计算软件。为了计算滤波器加载输出段的频带曲线, 本文采取了如下的方法: 首先将不加滤波器的三维输出腔等效成一个与之具有相同频率和 Q 值的二维腔体 (见图 2), 然后在该二维输出腔体上加上滤波器膜片 (见图 3), 再求解区域内的场分布以及场点的场随频率变化的曲线。

3 滤波器输出段各参数对频带特性的影响

影响滤波器输出段频带特性的主要参数有: 输出腔的频率 F 、 Q 值以及膜片各相关尺寸, 开口宽度 C , 位置 L , 厚度 T 。在以下的计算中, 我们只改变一个参数, 而让其它的参数保持不变。

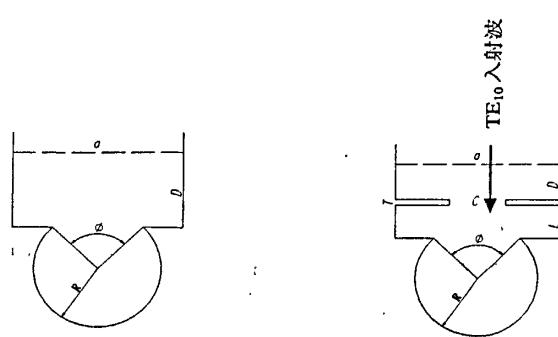


图 2. 等效的二维腔体

图 3. 具有两节滤波器的宽带速调管输出段

1) 输出腔频率 F 的影响

如图 4 所示, 当 F 变低时, 频带曲线的低端变高; F 变高时, 频带曲线的高端变高。两种情况的频带曲线的中心位置基本保持不变。

值得说明的是, 图 4—图 8 的纵坐标均为电场强度的平方 (已假定 TE_{10} 入射波的幅值为 1), 其中, 曲线 0 对应的输入参数为: $F=5640.2\text{MHz}$, $Q=458.6$, $C=19\text{mm}$, $L=27.51\text{mm}$, $T=1.9\text{mm}$, 波导宽边尺寸 $a=47.55\text{mm}$ (下同)。

2) 输出腔 Q 值的影响

如图 5 所示, 当 Q 值变低时, 中部和低端变低, 带宽变宽; 当 Q 值变高时, 中部和低端变高, 带宽变窄。两种情况的频带曲线的高端基本不变。

3) 膜片开口宽度 C 的影响

如图 6 所示, 当 C 变小时, 频带曲线的低端变高, 高端变低; 当 C 变大时, 则相反。

4) 膜片位置 L 的影响

如图 7 所示, 当 L 变小时, 频带曲线的低端变高, 高端变低; 当 L 变大时, 则相反。这与 C 的变化有点相似。

5) 膜片厚度 T 的影响

如图 8 所示, 当 T 变小时, 曲线中部隆起, 带宽变窄; T 变大时, 曲线中部下弹, 带宽变宽。

4 结束语

本文开发的边界元滤波器计算软件, 不仅计算速度快, 而且计算精度高, 这已在滤波器输出段的冷测中得到了验证。它是设计和调试宽带速调管滤波器型输出段阻抗一频带特性的有效工具。由于本边界元计算软件只局限解决二维问题, 不能处理输出腔的三维结构, 为此, 作者正在开发三维边界元计算软件。目前, 建模和编程工作已经完成, 调试工作正在顺利进行。

参考文献

- 1 电子管设计手册编辑委员会, 大功率速调管设计手册, 国防工业出版社, 1979年9月, 第12页。
- 2 丁耀根, 现代雷达用的宽频带大功率速调管, 现代雷达, 1995年4月, 第2期, 第78—84页。

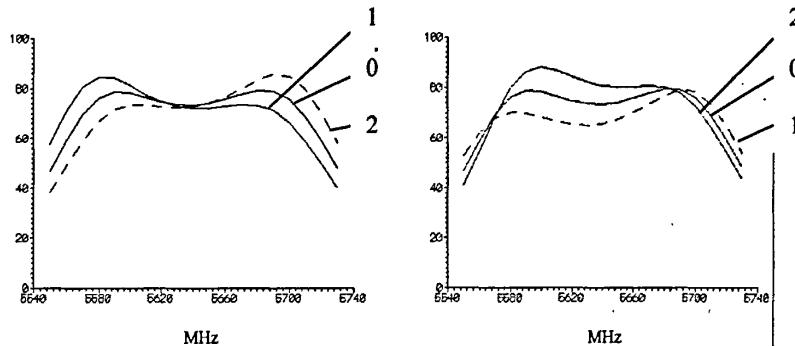


图4. 输出腔频率 F_0 的影响曲线
(1: $F=5631.78\text{MHz}$, 2: $F=5648.58\text{MHz}$)

图5. 输出腔 Q 值的影响曲线
(1: $Q=409.96$, 2: $Q=505.23$)

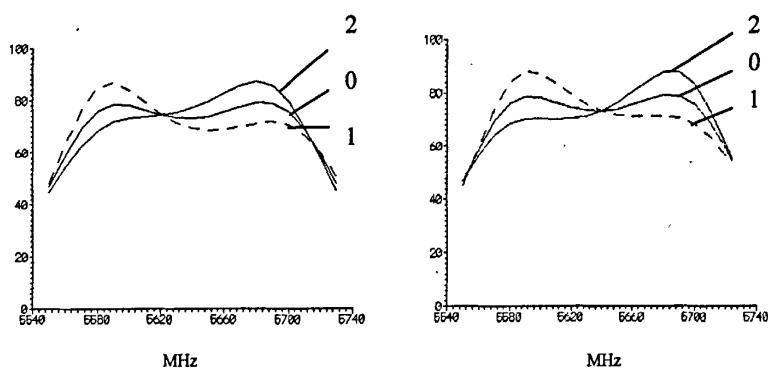


图6. 膜片开口宽度 C 的影响曲线
(1: $C=18.8\text{mm}$, 2: $C=19.2\text{mm}$)

图7. 膜片位置 L 的影响曲线
(1: $L=27.41\text{mm}$, 2: $L=27.61\text{mm}$)

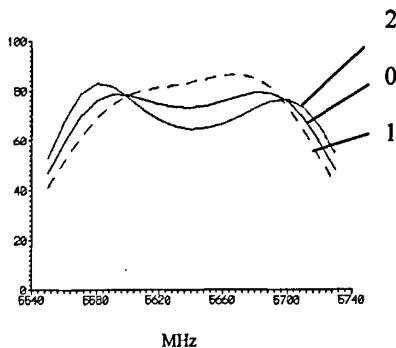


图8. 膜片厚度 T 的影响曲线
(1: $T=1.4\text{mm}$, 2: $T=2.4\text{mm}$)

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>