

高频系统电子管功率放大电路的建模与仿真

胡桐宁¹, 李冬², 杨军², 余调琴²

(1. 华中科技大学 电子与信息工程系, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 电气学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据四极电子管 4CW10000B 用户手册提供的电气参数和性能测试曲线, 利用 ADS 软件建立仿真模型。结合华中科技大学研发的回旋加速器 (CYCHU-10) 高频 (RF) 系统的功率放大要求, 利用电子管设计一个输出功率为 10 kW 的功率放大器 (PA), 同时考虑到了无源网络匹配问题。对 101 MHz RF 系统中电子管功率放大器进行了仿真, 仿真结果符合预期设计指标。

关键词: 真空管; 功率放大; 网络匹配; 高频系统

中图分类号: TM934.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)04-0031-03

Modeling and simulation of tube power amplifier for RF system

Hu Tongning¹, Li Dong², Yang Jun², Yu Tiaoqin²

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Electronic and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: At first, a simulation model is implemented by ADS software in this paper, depending on the electric parameters and performance measuring curves provided by the user handbook of 4CW10000B tetrode. According to the demands and targets of the RF system of Cyclotron CYCHU-10 developed in Huazhong University of Science and Technology, this paper designs a tube power amplifier (PA) with 10 kW output power, considering matching problems of passive networks. In the end, the simulation results of tube power amplifier at 101 MHz are given in this paper and they agree with the design expectations.

Key words: tube; PA; network matching; RF system

回旋加速器高频 (RF) 系统中采用的功率放大器类型主要有固态电路和真空管两种^[1]。前者采用双极型晶体管或者场效应管作为放大元件, 多级并联实现较高功率传输, 具有高稳定性、高可靠性等优点, 但其工作频率容易受到限制。真空管主要有四极管和束调管两种, 利用电场对真空中电子流的作用获得信号放大, 真空电子管造价低、承受负载的能力强, 允许负载在较大的范围变化, 可以不使用环流器, 线性度也优于普通的晶体管, 适合于大功率的应用场合, 但也具有体积大、功耗大、寿命短、需要高压电源和较大的推动功率等缺点。

华中科技大学电气学院研发的 CYCHU-10 高频系统, 中心频率为 101 MHz, 其功率放大器的输出功率为 10 kW, 考虑到固态放大电路的频率以及负载能力的限制, 这里采用四极管作为末级放大电路。

本文参考数据手册, 选用适当的经验公式为四极管

建模, 在得到与厂家测试数据一致的仿真结果后, 调整其工作状态, 得到实际应用中的特性曲线。然后在此模型的基础上, 添加输入和输出匹配网络, 建立完整的四极管功放电路模型, 并仿真分析出有信号激励下的输出波形。

1 四极管建模

1.1 四极管简介

首先被用于无线电通讯领域中的是三极电子管。尽管三极电子管发明后, 使无线电通讯、广播等产生了质的飞跃, 但其性能有诸多不足之处: 首先是栅极和阳极之间存在着较大的过渡电容, 用于高频放大时, 将产生自激; 其次是其放大倍数很难达到 100 倍以上。

四极管^[2]就是在三极管中的板极 (或阳极) 和栅极之间引入屏栅极, 加恒定的正电位, 并以较大的电容与阴极相连, 使其在高频时处于阴极电位, 保证完善的屏蔽

《微型机与应用》2011 年 第 30 卷 第 4 期

硬件纵横

Hardware Technique

两组不同的 V_p 、 I_p 和 V_g 值；再采用参考文献[1]介绍的数值方法，计算得到阳极电流中的直流和一次谐波分量的值，并依此计算得到直流功率和射频信号功率的值分别为 16.0kW 和 9.4kW，从而得出实际效率 $\eta=59.2\%$ ，输出电阻 $R_{out}=1.7\Omega$ 。

2.2 匹配网络

要实现功率的最大传输，必须使负载阻抗与源阻抗相匹配，通常做法是在负载和源之间插入一个无源匹配网络^[4]。而保证了负载电阻得到最大功率并实现对阳极输出信号进行滤波的作用。

这里电子管输入匹配网络的功能

有：将栅极的输入电阻 $R_{in}=200\Omega$ 变化为电源的标准内阻；将频率稳定在加速器的工作频率 101 MHz 上。为了保证负载电阻得到最大功率的同时实现对阳极输出信号的滤波作用，需要一个输出匹配网络，图 5 分别给出了输入匹配网络 S 参数仿真结果，可以看出该电路满足要求。

同理，可设计仿真输出匹配网络，得到的 S 参数仿真结果同样满足要求，即输入输出网络都很好地实现了阻抗变换和滤波的作用。

2.3 总体电路仿真

综合电子管 101 M 模型以及输入输出匹配网络，设计出整个末级功放的系统仿真原理图，其中包括了直流偏置，其值取前面计算的各级电压，负载直接用电阻代替。在 ADS 中使用瞬态仿真器，得到负载上的输出电压和电流的时域波形，取其平均值计算，则输出电压和电流峰值分别为： $V_{outm}=5.7\text{kV}$ ， $I_{outm}=3.4\text{A}$ ，由此计算出输出射频功率 $P_{out}=9.7\text{kW}$ ，与设计指标基本一致。

从前面的建模和仿真可以看出，结果比较理想。由于在级联的过程中，级间存在耦合关系，这在各个放大级独立仿真时并没有考虑到，所以级联后整个系统的总响应和输出结果不一定很理想。文中所建立的功率放大器阳极的输出负载也是阻抗随时间变化的谐振腔，且其

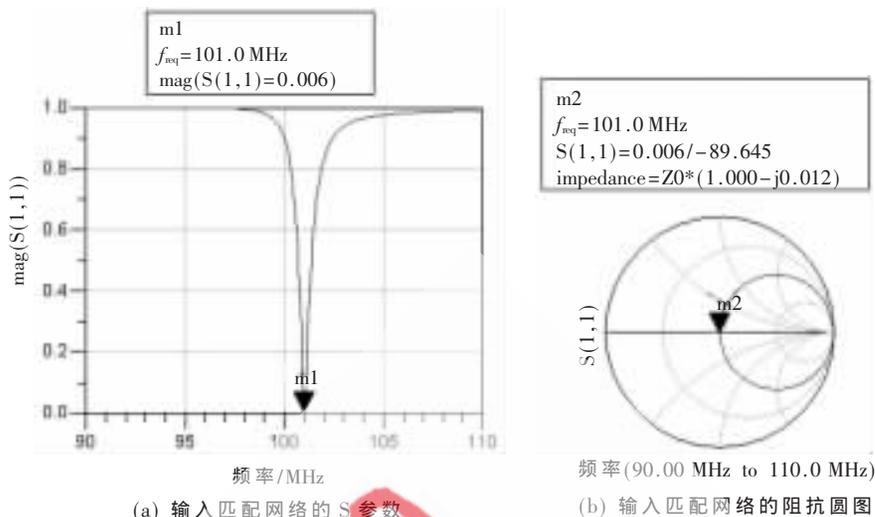


图 5 输入匹配网络的仿真结果

输入输出回路都采用谐振腔。因此，在后续工作中，需要对该模型的结构和参数进行优化，另外要考虑功率放大器和谐振腔整个系统的仿真。

参考文献

- [1] CARTER R G, Review of R.F. Power sources for particle accelerators, RF engineering for particle accelerators, CERN, 1993:269-272.
- [2] 郑国川, 李洪英. 电子管功放设计和装调技术[M]. 福建: 福建科学技术出版社, 2005:27-40.
- [3] LEACH M W. SPICE Models for Vacuum-tube amplifiers, J. Audio Eng. Soc. 1995,43(5):117-126.
- [4] LUDWIG R, BRETCHKO P. RF Circuit design: theory and applications[M]. Pearson Education Prentice Hall, 2002: 270-275.

(收稿日期: 2010-08-24)

作者简介:

胡桐宁, 女, 1983 年生, 博士研究生, 主要研究方向: 回旋加速器 RF 系统。

李冬, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要研究方向: 回旋加速器控制系统。