

一种宽带速调管中高次模式振荡的抑制

张志强 王勇 罗积润 丁耀根

(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

摘要: 该文描述了在一种 S 波段宽带速调管研制过程中出现的高次模式振荡现象, 分析了抑制这种振荡的可能方式, 提出了一种抑制这种振荡的方法。该方法通过改变谐振腔结构, 在基本不影响基模频率的前提下, 使高次模式频率产生较大的改变, 从而使该高次模式的振荡得到抑制。利用 Ansoft HFSS 模拟设计软件, 对谐振腔进行了改进设计并完成了相应的实验验证。利用改进设计的谐振腔, 进行了速调管整管试验, 有效地抑制了速调管中高次模式的振荡。

关键词: 宽带速调管; 高次模式振荡; 振荡抑制

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0710-04

DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00149

Suppression of High Order Mode Oscillation in a Broadband Klystron

Zhang Zhi-qiang Wang Yong Luo Ji-run Ding Yao-gen

(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The phenomena of a high order mode oscillation in a broadband klystron are described in this paper. Some methods are discussed for suppressing parasitical mode oscillation in klystron resonant cavity. One new method is used to eliminate the oscillation in the broadband klystron. The method can make the high order mode frequency change enormously but the fundamental mode frequency alter faintly through adjust the structure of a resonant cavity, thereby the high order mode oscillation is suppressed. An improved design for resonant cavity with Ansoft HFSS code and corresponding experimental approval has been performed. The testing result of the klystron with the improved resonant cavity shows that the high order mode oscillation can effectively be suppressed.

Key words: Broadband klystron; High order mode oscillation; Parasitical mode oscillation suppression

1 引言

速调管以其功率大的特点已经广泛应用于通信、雷达、导航、直线加速器等领域。在加速器领域主要应用高功率、点频工作的速调管^[1], 这些速调管由于谐振腔较少, 频带很窄, 一般不会出现高次模式振荡问题。但在一些军用预警雷达系统中, 由于抗干扰的需要, 要求速调管具有一定的瞬时带宽。然而, 由于速调管频带宽度的增加, 就可能产生高次模式振荡问题, 它不仅影响速调管的效率和增益特性, 严重时造成速调管不能正常工作^[2]。因此在宽带速调管的设计中必需考虑如何抑制高次模式振荡问题。为了抑制高次模式振荡, 研究人员采用了很多有效的办法。文献[3]通过在速调管谐振腔内等离子喷涂含有 FeNi 合金的微波吸收材料降低振荡模式的 Q_L 值来抑制高次模式振荡。此外, 文中还提到了通过调节聚焦磁场参数值也可以削弱寄生振荡。文献[4]是通过给主谐振腔外接吸收腔的方法来

抑制振荡模式, 达到消除振荡的目的。以上消除振荡的方法在某种程度上需要牺牲管子的增益, 本文仅仅通过改变谐振腔结构的方式, 在基本上不改变管子增益的基础上, 将高次模式振荡移到工作频带之外, 成功实现了对高次模式振荡的抑制。

2 振荡现象的描述

本文讨论的 S 波段宽带速调管产生的振荡现象出现在高频测试实验中。实验观察发现, 当速调管高频激励频率为 2.79 GHz 时, 示波器显示的速调管高频脉冲波形的包络后沿幅度减小, 与前沿幅度相比有较大落差, 形成台阶, 波形抖动^[5]。此时, 高频输出功率减小, 钛泵电流明显增加, 速调管真空度变差, 严重时造成电源调制器自动开启钛泵电流保护, 切断高压, 使速调管不能正常工作。在 2.79 GHz 处频谱仪分析发现谱线明显加宽, 两侧频率谱线幅度显著增加(如图 1 所示), 而且其二次谐波 5.58 GHz 处谱线幅度很高, 与 2.79 GHz 处的谱线幅度相当。而当信号源频率移开 2.79 GHz, 工作在其它频率时,

频谱纯度有明显改善(如图 2 所示)。当振荡现象发生时，通过调节电子枪区的磁场使电子注变细可以缓解振荡的强度，但此时其它频率点的输出功率将有较大下降。

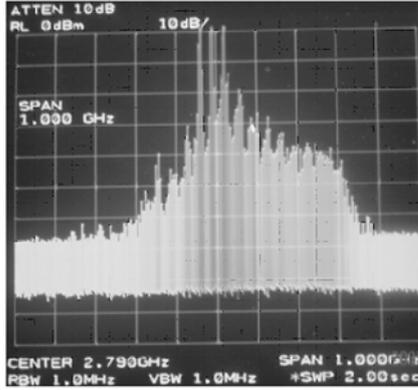


图 1 高频激励频率为 2.79 GHz 时速调管输出频谱

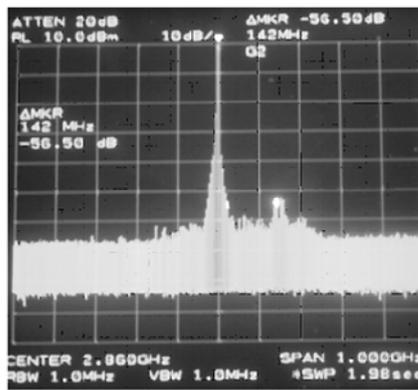


图 2 高频激励频率为 2.86 GHz 时速调管输出频谱

3 振荡原因的分析

当速调管工作在 2.79 GHz 时，5.58 GHz 处存在二次谐波是必然的，但一般二次谐波幅度比基波幅度小很多(二者之差一般大于 30 dB)，且频率已经在工作频带之外，通常不会影响速调管输出频谱性能。因此，造成高频振荡的问题可能是其它原因。如果某个谐振腔存在频率为 5.58 GHz 的高次模式振荡，则它会对电子注进行调制，可能在输出端产

生一定的振荡输出功率，从而干扰工作频率输出的大小、稳定和频谱特性。当这一高次模式振荡的频率与工作频率的二次谐波一致时，这种影响可能更为明显，二者相位相关将进一步加剧问题的严重性。这是因为在不加载的情况下，谐振腔的高次模式振荡与电子束作用产生的能量远高于工作模式二次谐波的能量。当速调管谐振腔的高次模振荡频率接近二次谐波频率时，在高频脉冲包络的后沿部分，群聚电流会与高次模式交换能量，大大削弱其与基模的能量交换，此时高次模式能量将被放大，基模能量被放大的幅度减弱，造成速调管的输出功率降低，波形不稳定，这就形成了图 1 所示的频谱图。当速调管工作频率偏离 2.79 GHz 后，频谱仪仍然显示 5.58 GHz 的谱线存在，但其强度和对工作频率的影响大幅下降，这充分表明振荡频率靠近工作频率的二次谐波以及两者相位相关对工作稳定性作用的严重性。

通常宽带速调管群聚段部分由多个频率不同的重入式谐振腔参差调谐组成(模型如图 3 所示)。为了展宽带宽和抑制寄生模式振荡，工程研制中多采用微波吸收材料加载。不过，为了获得足够的增益和减少腔的数量，个别群聚腔并不加载，这便存在高次模式振荡的可能。这里研究的速调管各谐振腔工作在基模 TM_{010} 时的情况^[6-8]，其电场如图 4 所示，电场只有纵向分量 E_z ，磁场只有横向分量 H_ϕ ，纵向电场分量最大值 E_{zm} 沿 r 方向出现 1 次，而沿 ϕ 和 z 方向没有最大值出现，即电场强度均匀，无疏密变化。除 TM_{010} 模之外每个谐振腔均存在高次模式^[9]，依次为 $TM_{011}, TM_{110}, \dots, TM_{011}$ 模的电场如图 5 所示。为了确认前面对高次模式振荡的分析，我们对未加载的谐振腔进行“冷”测扫频实验，实验发现其中有一个腔除在设计频率处有谐振峰外，在频率为 5.58 GHz 处还有一明显的谐振峰，而且 Q 值很高。根据选用的结构尺寸，估计该高次模式可能是 TM_{011} 模。

为了进一步确定上述腔中“冷”测发现的振荡模式就是 TM_{011} ，我们利用 Ansoft HFSS 3 维电磁

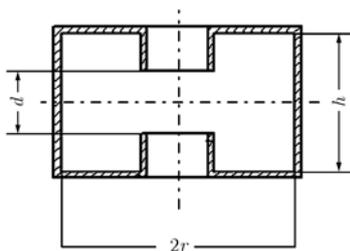


图 3 重入式谐振腔模型

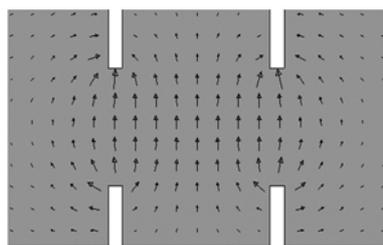


图 4 TM_{010} 模电场分布

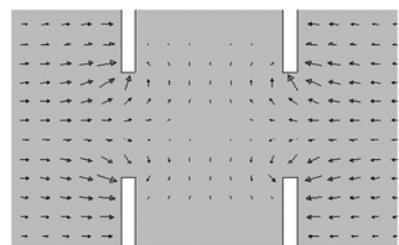


图 5 TM_{011} 模电场分布

计算软件, 构建了重入式谐振腔计算模型, 计算了该腔中部分模式的谐振频率, 发现腔中 TM_{011} 模的谐振频率为 5.583 GHz, 与“冷”测结果吻合得很好。

4 振荡现象的抑制

高次模式的振荡严重影响管子输出功率、频谱和稳定性, 必须采取相应技术措施加以抑制。为了解决这一振荡问题, 我们尝试了各种不同的办法。实验发现, 如果不对速调管进行任何调整, 在高频测试时, 可通过调节电子枪区的磁场来改善振荡强度, 但此时电子注变细, 电子注能量与高频能量交换不充分, 极大地影响了功率频率特性, 造成全频带的输出功率均不能达到技术指标要求。采用对存在高次模式振荡的谐振腔进行加载的办法, 对高次模式幅度抑制能够达到满意的效果。不过, 由于谐振腔的加载, 导致速调管频带内其它频率的增益均有所下降, 对速调管的输出功率有较大影响, 从而频带内部分频率点输出功率不能满足设计要求。在存在高次模式振荡的谐振腔上附加一个内表面涂覆微波吸收材料的吸收腔, 也是一种非常有效的抑制高次模式振荡的办法。不过, 这种办法带来的结构变化可能加大工艺的难度, 同时在结构设计上必须进行较大的调整。此外, 当振荡功率较大时, 吸收材料吸热温度上升产生放气现象, 从而可能会带来另外的不稳定现象。

基于上述方案存在的问题, 本文提出一种新的方案。通过调整谐振腔结构, 即恰当地改变谐振腔直径与腔高的比例关系, 使其高次模式 TM_{011} 的频率有较大幅度的变化, 而对基模 TM_{010} 的谐振频率特性影响较小。要保证基模的频率基本不变, 谐振腔直径与腔高必须同时朝相反的方向改变, 本方案采用了缩小谐振腔直径而增高腔高的办法。无论高次模式的频率变高或变低, 只要保证调整后的高次模式频率与工作频带的二次谐波频率不同并且在工作频带之外, 就能够解决问题。基于这样一个改进设计原则, 利用 Ansoft HFSS 高频模拟设计软件, 我们建立了适应本设计的仿真模型, 通过合理调整腔结构尺寸, 对谐振腔进行了改进设计, 使得 TM_{010} 模的谐振频率基本没有发生变化(改进设计前为 3.110 GHz, 改进后为 3.109 GHz), 而 TM_{011} 模的谐振频率变化了约 3%(改进设计前为 5.583 GHz, 改进后为 5.420 GHz), 并且 TM_{010} 模的特性阻抗和 Q 值都没有明显变化。从而从模拟设计上实现了工作模式频率基本不变, 高次模式谐振频率偏离基模腔二次谐波频率的原则。

按上述理论分析和计算机模拟结果, 分别按改进前后的结构尺寸加工了“冷”测模型, 分别对模型中 TM_{010} 模和 TM_{011} 模的频率进行了“冷”测, 结果表明, Ansoft HFSS 软件的设计结果与实验有很好的一致性。对于 TM_{010} 模, 改进前频率为 3.112 GHz, 改进后为 3.111 GHz; 对于 TM_{011} 模, 改进前频率为 5.580 GHz, 改进后为 5.419 GHz。在这一实验佐证的基础上, 我们进行了整管实验, 结果表明, 在瞬时带宽为 10% 的工作频带内, 管子输出功率、频谱和稳定性均满足设计要求, 不存在任何振荡现象。图 6 给出了改进后速调管正常工作时, 输入信号频率为 2.79 GHz 的输出频谱图。

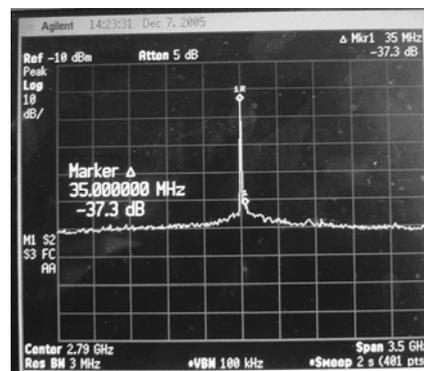


图6 改进后高频激励频率为 2.79 GHz 时的输出频谱

5 结论

在宽带速调管中, 当 TM_{011} 高次模式振荡频率与输入信号二次谐波频率一致时, 将严重影响速调管输出频谱特性。本文通过改变谐振腔几何结构, 在对工作模式 TM_{010} 影响很小的基础上, 使高次模式偏离工作模式的二次谐波频率, 成功地消除了高次模式振荡对工作模式频谱特性的影响, 保证了速调管输出功率和频谱的稳定性。

参考文献

- [1] Wang Yong, Xie Jing-xin, Ding Yao-gen, and Liu Pu-kun. Development of an S-band 50MW klystron. Eighth IEEE International Vacuum Electronics Conference, Kitakyushu, Japan, 2007: 153-154.
- [2] Becker U, Krietenstein B, Weiland T, Dohlus M, and Ko K. Simulation of Oscillations in High Power Klystrons. Proceeding of European Particle Accelerator Conference, Barcelona, 1996: 1274-1275.
- [3] 丁耀根. 大功率速调管中寄生振荡问题的实验研究. 电子科学学刊, 1992, 14(4): 409-415.
Ding Yao-gen. Experimental studies of parasitical oscillations in high power klystron. *Journal of Electronics*, 1992, 14(4):

- 409-415.
- [4] 张瑞, 王勇. TM_{610} 高阶模圆柱谐振腔的模拟研究. 强激光与粒子束, 2006, 18(7): 1129-1133.
Zhang Rui and Wang Yong. Simulation of TM_{610} higher-order mode cylindrical cavity. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1129-1133.
- [5] 周祖圣, 董东, 王书鸿. 国产 45MW 速调管实验研究. 原子能科学技术, 2008, 42(5): 398-399.
Zhou Zu-sheng, Dong Dong, and Wang Shu-hong. Experimental studies on 45MW high power klystron. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(5): 398-399.
- [6] 把慧荣, 张兆传. TM_{020} 模多注速调管圆柱谐振腔的仿真设计. 电子器件, 2008, 31(5): 1647-1649.
Ba Hui-rong and Zhang Zhao-chuan. Design and simulation of TM_{020} mode multi-beam klystron cylindrical cavity. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(5): 1647-1649.
- [7] 曹静, 丁耀根, 沈斌. TM_{310} 模的同轴谐振腔与波导孔耦合及场分布研究. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1521-1524.
Cao Jing, Ding Yao-gen, and Shen Bin. Research on field distribution of TM_{310} mode in cylindrical coaxial cavity resonator with coupling of waveguide hole. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1521-1524.
- [8] 董玉和, 丁耀根, 肖刘. 同轴谐振腔高阶横磁模式参数的研究. 物理学报, 2005, 54(12): 5629-5630.
Dong Yu-he, Ding Yao-gen, and Xiao Liu. Research on parameters of higher-order transverse magnetic modes in cylindrical coaxial cavity resonator. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(12): 5629-5630.
- 张志强: 男, 1975 年生, 高级工程师, 研究方向为物理电子学.
王 勇: 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为物理电子学.
罗积润: 男, 1957 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为物理电子学.
丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为物理电子学.