

## X 波段盒形输出窗频率特性的改进

张 丁

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

(中科院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文首先详细阐述了判别输出窗鬼模的原则和方法, 然后以一个 X 波段输出窗为例介绍如何应用三维电磁场计算软件微波工作室对输出窗进行改进, 计算与冷测均得到了较好的结果, 可以满足实际需要, 对输出系统的设计具有很高的参考价值。

**关键词:** 速调管; 输出窗; 电压驻波比

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1518-03

## Improvement of Frequency Characteristics for a X-Band Pill-box Window

Zhang Ding

(Institute of Electronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** How to distinguish the ghost-mode in window is illuminated at first and then the method is introduced using Microwave Studio, a three-dimension simulating soft, to improve a X-band output window. The data of calculation and test are very good and the window can be used in practice, which is very useful for output system designs.

**Key words:** Klystron; Output window; Voltage standing wave ratio

### 1 引言

输出窗是大功率微波电真空器件、加速器和其他大功率微波电子系统的关键部件, 对器件和系统的频带、功率容量、可靠性和寿命具有重要作用。它的作用是将大气和真空隔开, 为微波功率提供一个输出窗口。

速调管对输出窗的要求主要集中在 3 个方面: (1)输出窗的驻波比要小, 通常要求输出窗在工作频带内的驻波比在 1.1 以下; (2)要有很好的机械强度, 窗片要能承受管体内外的气压差; (3)要有足够的功率容量, 在工作的过程中窗片不炸裂, 窗内不打火。

速调管的输出窗的形式多种多样, 目前用的比较普遍的是盒形窗和波导窗, 同轴窗由于其功率容量相对较小因此在大功率速调管中基本不采用<sup>[1]</sup>。盒形窗是将一个圆盘介质片(通常为氧化铝陶瓷)密封在截面相同的圆波导中, 两端通过转换和矩形波导相连, 这种窗的优点是承受的功率容量大, 频带宽, 结构简单, 在工艺上也比较成熟, 因此获得了非常广泛的应用。

以往对于盒形窗结构的分析工作都是采用等效电路方法进行计算, 分析结果具有一定的局限性<sup>[2]</sup>。这是因为由等效电路方法推导出的计算公式在一些特定的场合没有解, 而这

些场合在实际冷测时往往对应于某些频率点处的高反射峰, 是具有特定含义的。

一个性能良好的输出窗除了要求在频带内无杂谱和驻波比较小之外, 还应进行热分析<sup>[3]</sup>, 为了进一步提高功率容量也可采用其他结构的微波窗<sup>[2,4]</sup>, 或采用价格昂贵的蓝宝石或金刚石作为窗片材料<sup>[5]</sup>。

矩形波导  $TE_{10}$  模在圆柱波导中除了激励起工作主模(圆  $TE_{11}$  模)外, 还激励起其它的非主要模式, 由于矩形波导对一些非主要模式截至, 这些振荡模式称为鬼模<sup>[6]</sup>。通常认为电场垂直于窗片的鬼模对微波窗有严重的危害性, 必须将其移出工作频带, 以避免鬼模振荡造成微波窗的损坏。

本文仅讨论如何利用 MicroWaveStudio(MWS)对实际应用中的某 X 波段盒形输出窗进行改进, 将鬼模移出频带同时获得较好的驻波特性。

### 2 输出窗的结构以及用 MWS 模拟计算输出窗的鬼模

为了在 8.4-8.8GHz 的频带内获得较好的功率传输特性, 本文采用如下结构的输出窗: 窗片采用直径为 28.5mm, 厚度为 1.2mm 的国产 95% 的氧化铝瓷, 其相对介电常数为 9.0; 窗框直径为 28.5mm, 长度为 8mm, 窗片置于窗框中间; 窗框两端的波导为国标 BJ84 标准波导(28.5mm×12.6mm), 其结构如图 1 所示:

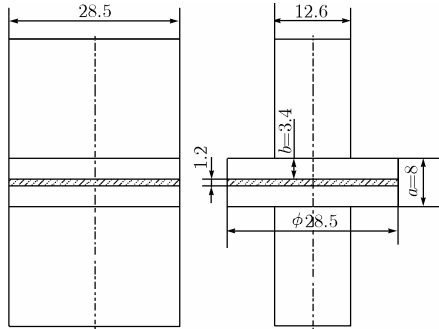


图1 改进前的输出窗结构

经过冷测该输出窗在频带内的驻波比均小于 1.1, 装配此输出窗的一只速调管满功率工作, 未出现异常, 但是在研制另一只速调管时发现该输出窗在 8494MHz 位置出现鬼模。因此决定用 MWS 对该输出窗进行改进。

首先, 将两端波导封闭, 计算输出窗内存在的本征模式, 输出窗内的本征模频率从低到高依次如表 1 所示:

表 1 波导口封闭时输出窗内的本征模式(波导长 20mm)

模式	1	2	3	4	5
频率 (GHz)	5.463	7.501	7.817	8.504	8.944
模式	6	7	8	9 **	10 **
频率 (GHz)	9.187	9.512	10.936	11.007	11.221

由以上计算结果可知, 从第 1 个模式到第 8 个模式均满足精度要求(\*\*表示其计算精度不够), 且只有模式 4( $f=8.504\text{GHz}$ ) 在频带 8.4~8.8GHz 内, 因此模式 4 即可能为该窗在该频带内的鬼模。

将两端封闭波导长度由 20mm 增加为 25mm 重新计算本征模, 所得结果如表 2 所示。

表 2 波导口封闭时输出窗内的本征模式(波导长 25mm)

模式	1	2	3	4	5
频率 (GHz)	5.316	6.955	7.817	8.504	8.526
模式	6	7	8	9 **	10 **
频率 (GHz)	8.935	9.187	10.128	10.933	11.220

将所得结果进行对比, 若某模式频率发生改变, 则可判定该模式为波导内的模式或人为封闭两端波导所形成, 并不真实存在于窗中。由以上结果可知, 模式 4 的频率没有发生任何变化, 因此可以确定模式 4 真实存在于该窗中。

最后, 观察模式 4 的场型, 主要确认其电场是否垂直于窗片, 如果其电场垂直于窗片, 则极易引起二次电子倍增, 必须移除; 否则, 则认为其危害不大。模式 4 的电场如图 2 所示。

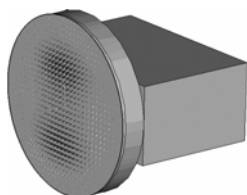


图2 输出窗鬼模的场型图

由图 2 可知, 模式 4 为圆波导内的 TM<sub>01</sub> 模式, 电场垂直于窗片, 因此必须将其移除。该模式的计算频率与冷测结果仅相差 10MHz, 相对误差为 0.12%。

### 3 用 MWS 改进计算该输出窗

#### 3.1 设法将鬼模移至频带外

由于鬼模频率更接近 8.4GHz, 因此决定将鬼模频率降低, 设法从频带低端移出。

通常在波导和法兰之间增加一个膜片可以降低输出窗鬼膜的谐振频率, 但是膜片的厚度和高度却很难确定。首先我们分别在两端的波导和法兰之间增加一个厚度为  $c=1\text{mm}$  的膜片, 膜片中间的矩形孔为  $28.5 \times d(\text{mm}^2)$ , 接下来我们将研究该膜片对输出窗的影响, 结构如图 3 所示。

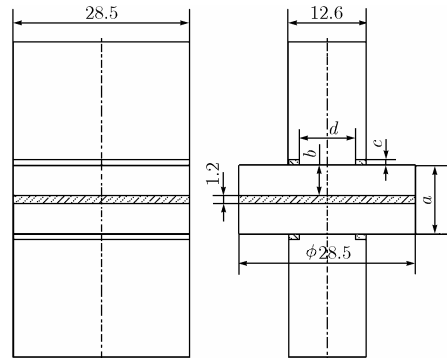


图3 改进后的输出窗结构

利用 MWS 的参量扫描工具(parameter sweep)计算膜片开口高度  $d$  变化时对应模式 4 频率的变化, 结果如图 4 所示。

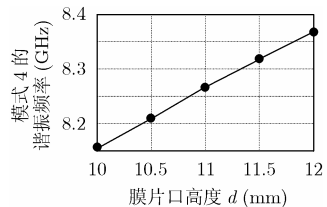


图4 改进后输出窗鬼模频率随膜片开口的高度  $d$  的变化规律

由图 4 可知, 随着  $d$  不断变小, 模式 4 的频率不断降低, 当  $d$  为 11mm 时模式 4 的频率降低到 8.267 GHz, 已离开频带足够远, 因此初步选定膜片开口的初始高度  $d$  为 11mm, 厚度为 1mm, 宽度等于波导宽度 12.6mm。

#### 3.2 优化结构获得理想驻波比

增加膜片后, 窗的功率传输特性大大降低, 其驻波比远远大于 1.1, 因此必须继续优化结构获得理想驻波比。

MWS 内置了一个功能强大的优化器, 首先分别将窗框长度  $A$  和膜片厚度  $c$  设为变量, 对变量赋以初值, 然后在求解器内确定要优化的变量和变量的变化范围, 最后确定优化目标即可由程序自动开始优化。本例中的优化目标为在频带内  $S_{21}$  最小, MWS 可同时对多目标进行优化, 因此同时对窗框长度  $a$  和膜片厚度  $c$  进行优化可大大节省计算时间, 在设定变量的同时要保证窗片始终处于窗框的中间。

第 1 次优化通常得不到最优的结果, 因此需要根据上一

次的优化结果不断更新变量,改变变量的变化范围再次进行优化,多次优化后即可获得较理想的结果。

经过多次优化,最终的结果是将窗框的长度  $a$  调整为  $a=11\text{mm}$ ,膜片厚度变为  $c=1.1\text{mm}$ ,膜片开口的高度  $d=11\text{mm}$  时可在  $8\sim 9\text{GHz}$  的频带内将驻波比调整到 1.02 以下,如图 5 所示,此时鬼模的频率降低为  $8236\text{MHz}$ 。

通常在一个软件的实际应用中,设计工程师都要关心模拟的精度,与实际测量值的误差和能否满足设计要求等问题。一般可以采用和实际测量值进行比较或几个软件之间的计算结果进行比较等方法。本文主要采用计算值和实际测量值进行比较的方法。

利用计算结果重新设计输出窗,利用微波信号源和测量线对改进后的输出窗进行性能测试,冷测结果如图 6 所示。

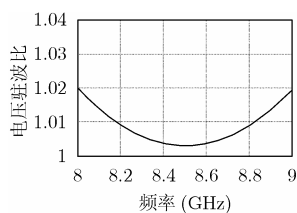


图5 改进后输出窗的驻波比计算结果

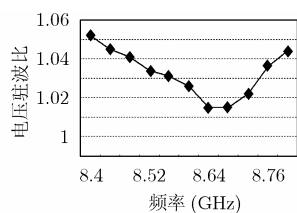


图6 改进后输出窗的驻波比冷测结果

改进后的输出窗在频带内驻波比均小于 1.05,考虑到测试系统的其他波导原件可能引起的反射,因此该窗在频带内实际的驻波比肯定小于 1.05,因此完全满足工程需要,此时鬼模频率降低为  $8255\text{MHz}$ ,与计算结果的相对误差为 0.24%。

#### 4 结束语

本文仅以 MWS 为例说明了输出窗的设计方法,但其中对鬼模的消除方法同样适用于使用其他计算软件的设计人员,参量扫描和自动优化功能也是设计自动化的必然要求,目前越来越多的软件也已开始配置此类功能,因此希望本文

能帮助更多的工程设计人员了解和熟悉此类设计方法。

**致谢** 本文的工作中得到了电子所器件中心多位同志的帮助和支持,曹敏同志在冷测中作了大量细致的工作,罗积润研究员纠正了原文中的一些错误和不足,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献

- [1] 中科院电子所编. 大功率速调管设计手册. 北京: 国防工业出版社, 1979: 164-166.
- [2] 吴常津等. 利用 MAFIA 程序设计  $8\text{mm}$  大功率输出窗. 真空电子技术, 2005, (1): 9-12.  
Wu Chang-jin, *et al.*. Design of a high power Ka-band millimeter wave window with MAFIA. *Vacuum Electronics*, 2005, (1): 9-12.
- [3] Michizono S, Saito Y, and Matsumoto T, *et al.*. RF-windows used at the KEKB linac. *Applied Surface Science*, 2001, 72(3): 1869-1875.
- [4] 王瑞敏等. 采用圆锥形陶瓷大功率微波输出窗的模拟分析. 电子与信息学报, 2006, 28(11): 2175-2178  
Wang Rui-min, *et al.*. The simulation of the conical-shaped-alumina ceramic pill-box RF-window. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2006, 28(11): 2175-2178.
- [5] Manfred thumm. State-of-the-art of high power Gro-Devices and Free Electron Masers Update 2003, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6708, Forschungszentrum Karlsruhe, Germany, February 2003: 22-24.
- [6] 林福民等. 圆柱盒形窗的连续波功率容限问题的研究. 强激光与离子束, 2003, 15(11): 1111-1116.  
Lin Fu-min, *et al.*. Research on passing CW power capacity of cylindrical box type window. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(11): 1111-1116.

张丁: 男, 1979 年生, 工程师, 从事多注速调管研制工作。