

• 微波能技术专辑 •

# 基于磁控管阳极电流检测的负载状态获取技术

官继红<sup>1</sup>, 刘长军<sup>2</sup>

(1. 深圳麦格米特电气股份有限公司, 广东 深圳 518057;  
2. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:**完整的微波系统通常配有定向耦合器以及微波功率计来检测反射功率,并以环行器来隔离反射回来的微波,以保护磁控管不被异常工况所损坏,以及实现更有效的加热控制。小功率磁控管因成本问题通常不会配备昂贵的微波反射检测系统以及环行器,在环行器失效以及未使用环行器的小功率微波系统中,磁控管的极易烧毁。为了解决上述问题,通过研究磁控管的起振模式,在变频电源上检测起振时阳极电流的脉宽特性,实现了对负载状态的获取,可以有效地保护磁控管不会在异常工况下损坏,并实现可靠的微波加热。

**关键词:**微波;空载检测;负载检测;阻抗检测;磁控管保护;阳极电流;脉宽;自动控制

中图分类号:TN123 文献标识码:A 文章编号:1002-8935(2021)02-0019-04

doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tm.2021.02.03

## Load Characteristic Acquirement Technology Based on Magnetron Anode Current Detection

GUAN Ji-hong<sup>1</sup>, LIU Chang-jun<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Megmeet Electric Co., Ltd., Shenzhen 518057, China;  
2. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** A conventional microwave system is usually equipped with a directional coupler and a microwave power meter to detect the reflected power, and a circulator to isolate the reflected microwave. So that the magnetron is protected from being damaged by abnormal working conditions and more efficient heating control is achieved. However, low power magnetrons are usually not equipped with expensive microwave reflection detection systems or circulators due to the high cost. In a microwave power source without a circulator, its magnetron is much easier to be burned. In order to solve the above problem, based on the study of the starting mode of a magnetron, the pulse width characteristics of the anode current in starting mode is detected on the frequency conversion board. A detection of the load characteristic is realized, which can efficiently protect the magnetron from damage under abnormal conditions and realize high reliable heating.

**Keywords:** Microwave, No load detection, Load detection, Impedance detection, Magnetron protection, Anode current, Pulse width, Automatic control

随着微波技术的发展,微波设备在民用及工业上取得了广泛的应用。调查数据显示,我国2020年1—3月家用微波炉产量达1259万台<sup>[1]</sup>。在实际应用中,磁控管由于体积小、价格低和效率高,得到了广泛使用,但是磁控管的异常损坏率居高不下,成为

设备可靠使用的第一大杀手<sup>[2-3]</sup>。对于1.5 kW以内的小功率微波系统来说,通常不会增加微波反射检测装置或增加环行器以隔离反射的微波,在空载状态下极易因微波反射而损坏磁控管。对于大功率的微波应用来说<sup>[4]</sup>,由于隔离器属于易损件,在隔离

基金项目:973项目(2013CB328902)

器失效后也容易造成磁控管的损坏。为了有效地保护磁控管,正确检测出磁控管的负载状态非常有必要。检测磁控管的负载状态可以实现智能化的加热,例如在工业加热设备的末端实现自动识别及控制,实现精确加热以及节约电能<sup>[5-6]</sup>。随着技术的发展,越来越多的磁控管采用变频电源进行供电,并且增加了电流和功率的控制<sup>[7-11]</sup>。

本文研究了磁控管负载对于磁控管起振态的影响,通过检测磁控管起振时的阳极电流,以极低成本实现了对磁控管负载状态的检测,对于微波技术的广泛应用具有积极意义。

## 1 理论分析

### 1.1 振荡器状态分析

图 1 为电感三点式 LC 振荡电路原理图, $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  为耦合电感,与电容  $C$  构成 LC 谐振电路, $C_b$  为耦合电容,提供正反馈给晶体管  $Q$ , $R_L$  为等效负载。

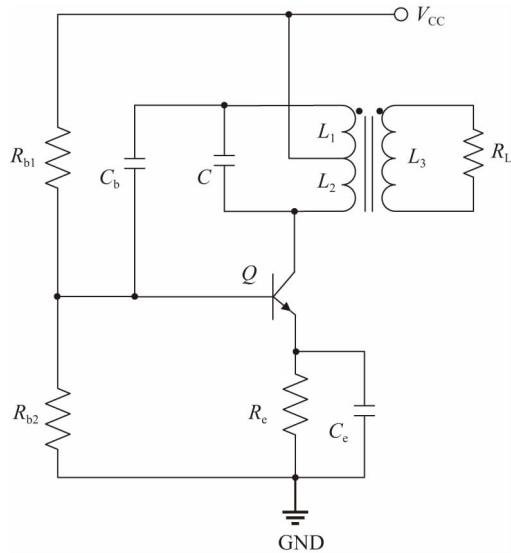


图 1 三点式 LC 振荡器

该 LC 振荡电路起振需要满足三个条件<sup>[12]</sup>:

(1) 相位条件,即反馈信号需要与输入信号同相,两者的相位差需要为  $2n\pi$  ( $n$  是整数);

(2) 幅值条件,即电压反馈系数  $F$  与放大器的电压放大倍数  $A_v$  的乘积大于 1:

$$A_v \cdot F \geq 1 \quad (1)$$

(3) 稳定条件,即振荡器具有一定实现幅度稳定和适应外界影响的自我调节能力。

在图 1 中,反馈信号接于电感  $L_1$  的同名端,满足了相位条件,影响振荡器工作的条件主要是幅值条件,即反馈幅值的条件。

反馈电容  $C_b$  一般在设计振荡器的开始就已经

选定。当晶体管的放大系数确定时,振荡器是否能够起振将取决于电容  $C$  的振荡电压幅值  $V_c$ ,如式(2)所示:

$$\begin{cases} F = i_b / i_c \\ i_b = V_c / X_{cb} \\ V_c = i_c \cdot Q \cdot R \end{cases} \quad (2)$$

式中, $F$  为电流反馈系数, $i_b$  为反馈到基极的电流, $i_c$  为晶体管集电极输出电流, $Q$  为 LC 电路品质因数, $R$  为等效负载电阻, $X_{cb}$  为电容  $C_b$  的容抗。根据式(2)可以得到:

$$F = Q \cdot R / X_{cb} \quad (3)$$

### 1.2 负载与振幅的关系

由式(3)可知,在理想状态下,反馈系数与负载电阻及品质因数相关。负载  $R_L$  较轻时,表现为  $Q$  值高,一个比较小的激励电流可以在 LC 上产生高的振荡电压。如果振荡电压高,通过  $C_b$  耦合到三极管基极的反馈电压高,振荡器容易满足起振条件,且振幅大。相反的情况,如果负载  $R_L$  较重时, $Q$  值低,不易起振,且振幅小。图 2 为在相同电流激励的条件下,不同  $Q$  值对应的 LC 输出电压( $Q_1 > Q_2 > Q_3$ )。由图可见较高的  $Q$  值对应于较高的振荡电压。

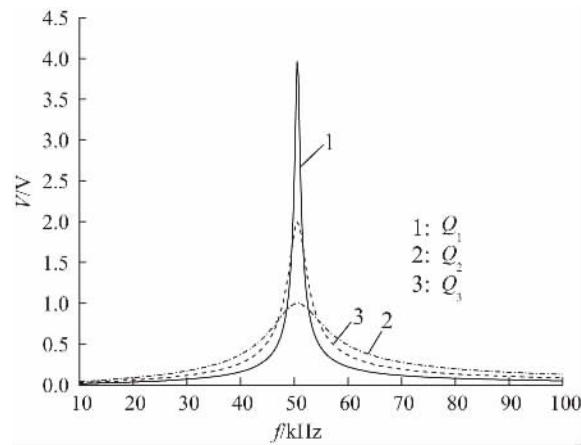


图 2 振荡电路的品质因数与振幅

将振荡电路的供电  $V_{cc}$  改为储能电容供电,并以恒定的小电流对储能电容进行充电。如果恒定的小电流不足以维持振荡电路需要的电流,振荡电路将处于间歇工作状态:即交替处于电容充电后振荡电路起振,电容放电后振荡电路停振的状态,因此,在此特定供电条件下,振荡电路具有如下结论:  
① 在轻负载条件下, $Q$  值较高,振荡电路易于起振,振荡维持时间长,振幅较大;  
② 在重负载条件下, $Q$  值较低,振荡电路不容易起振,振荡维持时间短,振幅较小。

### 1.3 磁控管等效振荡电路

小功率的磁控管由阴极灯丝、永磁铁、真空谐振腔、阳极、耦合天线等主要部件构成,其外观和等效电路如图3所示<sup>[13]</sup>。磁控管通常工作频率为2450±25 MHz,输出微波功率可以达到800 W左右,直流传化微波的效率可以达到70%左右,在量产后,磁控管的价格已经相当低廉。

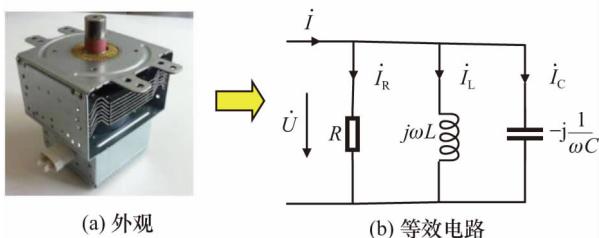


图3 磁控管外观和等效电路

磁控管谐振腔可以等效为图3中的LC部件,R等效为负载电阻,为了简化起见,磁控管的等效负阻或者电压源没有在图中绘出,磁控管的输出频率和功率也会受到负载的牵引而发生变化<sup>[14]</sup>。

以上磁控管的等效电路具有与LC振荡器类似的特性。由于磁控管本质上也是振荡器,如果处于间歇振荡模式,其输出微波也有会与负载相关联。

## 2 磁控管阳极电流检测

以常见的1 kW家用磁控管为例,采用变频电源供电。阳极电流检测电路如图4所示,交流电经整流后施加于母线,经过滤波电容C<sub>1</sub>,进入MOS管Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>与T<sub>1</sub>输入端构成的谐振半桥电路进行升压。在变压器T<sub>1</sub>的输出端,由二极管D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>和电容C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>构成全波倍压整流电路,输出高压直流施加到磁控管M<sub>1</sub>。磁控管M<sub>1</sub>阳极电流脉宽采集电路由U<sub>1</sub>单片机PIC12F1571完成。阳极电流采样电路由电阻R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>和电容C<sub>7</sub>构成,基准电压由R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>分压提供,通信电路主要由光耦U<sub>3</sub>、U<sub>4</sub>和电阻R<sub>6</sub>、R<sub>7</sub>、R<sub>8</sub>构成。

U<sub>1</sub>单片机内部集成了电压比较器和通用串口通信电路。阳极电流经采样电阻R<sub>2</sub>获得电压信号,通过R<sub>3</sub>和C<sub>7</sub>组成的低通滤波电路,连接到U<sub>1</sub>内置电压比较器。基准电压由R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>按照预设的比例分压形成,接于电压比较器的另外一端。电压比较器的输出经单片机U<sub>1</sub>内部进行脉宽捕获,并进行平均处理,然后通过串口输出,与上位机进行双向通信。实际加工的电路如图5所示,在实际测试中取得了良好的效果。

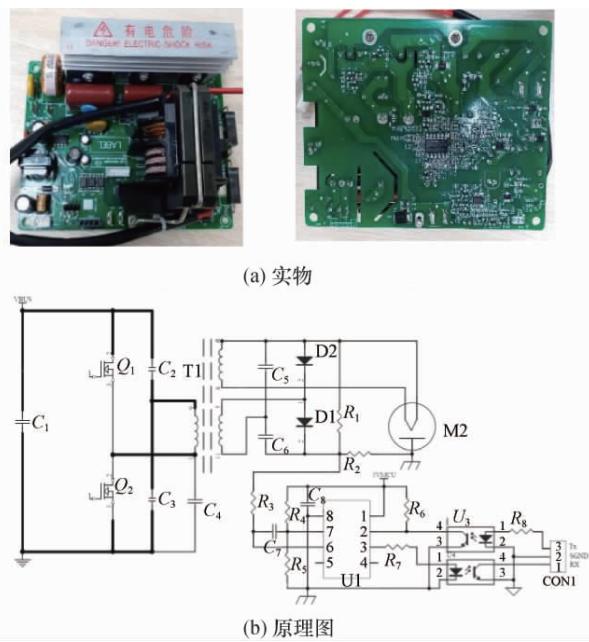


图4 检测电路实物及原理图

对磁控管起振状态进行分析:在磁控管阴极灯丝充分预热后,以较小的电流对储能电容充电,储能电容的负高压施加于阴极。一般1 kW磁控管起振电压阈值为4.0 kV。当阴极负高压超过4.0 kV时,磁控管将起振。由于供电的电流较小,不足以维持磁控管的振荡状态,此时储能电容发挥作用,磁控管将在小电流和储能电容的作用下,处于间歇振荡的工作状态。

## 3 实验测量及分析

搭建实验系统,采用变频电源为磁控管进行供电,引入储能电容使磁控管处于间歇振荡状态,通过数字示波器采集变频电源输出电流的波形。经过实验测量,在磁控管负载较重时,磁控管起振时阳极电流小,维持振荡的时间短。在磁控管轻载或空载时,起振时磁控管阳极电流幅值大且脉冲宽度宽。

以不同水负载定量对磁控管起振状态进行测试,分析其在不同负载条件下的起振阳极电流变化情况,以起振时阳极电流持续时间为测量基准,测量3支东芝2M303磁控管得到数据见表1,随着负载加重,阳极电流宽度逐渐减小。

表1 磁控管不同负载时阳极电流的宽度

负载	阳极电流宽度/μs
1000 ml水	2.16
重载	2.64
↑	3.42
轻载	4.50
空腔体	

磁控管在空腔体(空载)和1000 mL水(重载)时的电流变化如图5所示。磁控管负载较轻时,脉冲宽度达到4 μs以上,如图5(a)所示;磁控管负载较重时,阳极电流宽度变窄,降低到2 μs左右,阳极脉冲电流之间的间隔也随之变窄,如图5(b)所示。如果磁控管处于间歇振荡状态,就可以通过阳极电流的宽度,确定磁控管负载的状态。通过对多个磁控管以及市场常用不同厂家2M303、2M248、OM75P磁控管的测量,数据重复性良好,具有良好的实用意义。

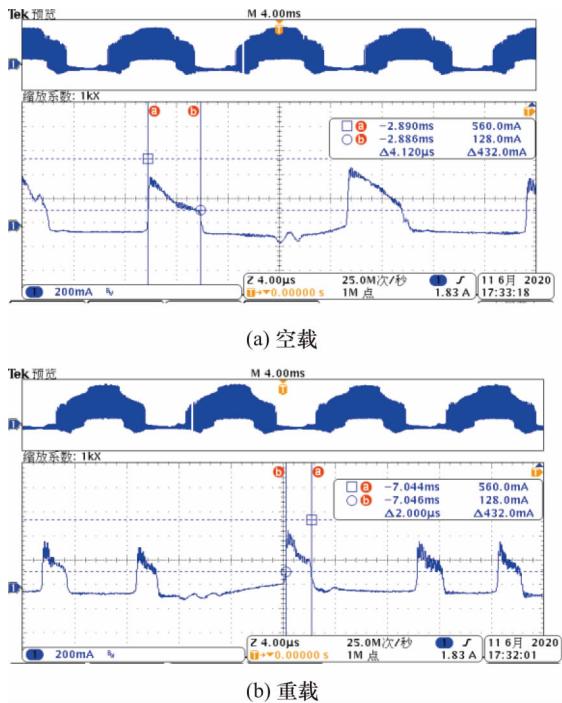


图5 空载和重载的阳极电流

对于通用变频磁控管微波电源来说,通常用数千pF的高压滤波电容并接于磁控管的阴极和阳极之间。在交流电压过零前后,此时提供给磁控管的电流有限,相当于以一个小小的电流给储能电容充电,从而使磁控管工作于间歇振荡状态。在该状态下,可以通过检测阳极电流脉冲宽度标定出负载状态。

对于一些大功率磁控管变频微波电源来说,在高压上电的初始态,也有间歇振荡的过程,也可以在工作过程中短时间降低阳极电流,模拟出间歇起振态,从而标定出磁控管的负载状态。

因此,通过监测磁控管电源的阳极电流宽度,就可以判断磁控管微波源负载的状态。根据先验知识或者实际测量的数据,判断当微波负载较轻可能损伤磁控管的时候,主动减少变频电源输出功率甚至切断电源以保护磁控管。特别是工业微波隧道炉,物料随着流水线移动,磁控管的负载随之发生变化,

有时会出现空载状态,采用该检测技术可以动态调整磁控管的工作电压,提升磁控管的寿命并减少电能的消耗。

#### 4 结论

本文设计了一种简洁易行的磁控管负载状态检测方案,用于标定磁控管负载特性以保护磁控管不被损坏以及根据负载特性采用合适的加热策略。

(1)本文提出的方法成本极低,接近于零成本,在普通使用场合能替代定向耦合器作为磁控管保护的方案。

(2)本方法只需对增加少量电子线路,占用空间小,能有效降低系统体积,磁控管电源与控制系统体积更为紧凑。

#### 参 考 文 献

- [1] 2020年3月家电行业产销数据月度简析[J]. 家用电器, 2020,(06): 93.
- [2] 张兆铿. 磁控管与微波加热技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2018.
- [3] 黄卡玛, 张兆传, 刘长军, 等. 激波: 从微波炉到大工业[J]. 科技纵览, 2017,(2): 76—77.
- [4] 位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路15 kW连续波微波磁控管相干功率合成技术[J]. 应用科技, 2018, 45(02): 34—37.
- [5] 王元柱. 微波炉的智能控制新技术应用[C]. 2015年中国家用电器技术大会, 2015: 991—993.
- [6] 李鑫培, 李超, 王榕, 等. 软开关电源在微波高温设备中的应用研究[J]. 价值工程, 2018, 37(11): 119—123.
- [7] 尹逊祥, 王春芳. 一种新颖低成本ZVS型磁控管用变频电源[J]. 电气应用, 2018, 37(14): 30—32.
- [8] 印长豹, 邓永峰, 高龙, 等. 灯丝电流联动的5kW微波电源[J]. 电子制作, 2018, (15): 27—28+40.
- [9] 杨威, 郑宏伟, 陈文光. 工业微波磁控管开关电源系统设计[J]. 真空电子技术, 2013, (01): 53—55+66.
- [10] 施晓勇, 吕世家, 贾昊松. 宽电压输入多端输出开关电源的设计[J]. 应用科技, 2016, 43(04): 41—45.
- [11] 蔡宣三, 张占松. 开关电源的原理与设计(修订版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 刘长军, 黄卡玛, 朱铧丞. 射频通信电路设计(第二版). 北京: 科学出版社, 2017.
- [13] 银振宇, 位宇, 刘臻龙, 等. 1kW注入锁定连续波磁控管微波相干合成实验研究[J]. 应用科技, 2016, 43(05): 20—23.
- [14] 张兆铿. 负载对磁控管振荡频率及输出功率的影响[J]. 真空电子技术, 2018, (03): 42—45+66.

收稿日期: 2021-01-07

(下转第33页)

## 5 总结

本文介绍了一种单频点复介电常数测量装置的仿真和测量原理,这种测量方法摆脱了传统的计算,更加方便,且由于加入了神经网络,使其有更多的优化空间进一步提高测量准确性。在结构上更便于测量少量样品和有腐蚀性的化学试剂,具有一定的可用性。

基于目前的测量效果,本装置还需进一步改进,优化腔体结构,通过增强 $S_{11}$ 参数的单调性拓宽复介电常数的可测量范围。

## 参 考 文 献

- [1] Roberts S, Von Hippel A. A New Method for Measuring Dielectric Constant and Loss in the Range of Centimeter Waves [J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17 (7):610—616.
- [2] Grignon R, Afsar M N, Y W, et al. Microwave Broadband Free-Space Complex Dielectric Permittivity Measurements Onow Loss Solids[A]. IMTC, Proceedings of the 20<sup>th</sup> IEEE[C], USA, 2003:865—870.
- [3] 方俊鑫. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [4] Mueller C H, Miranda F A. High Temperature Permittivity Measurements of Alumina Enhanced Thermal Barrier (AETB-8) Material for CEV Antenna Radomes[C]. IEEE Antennas & Propagation Society International

Symposium, 2010:1—4.

- [5] 刘宏梅,房少军,王强,等. 电路板的介电常数测量方法[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30( 2 ) : 82—84.
- [6] Westphal W B. Dielectric Constant and Loss Measurements on High-Temperature Materials, Laboratory for Insulation Research Technical Report[R]. MIT, 1963.
- [7] Seo Sanghyun, Stintzing Thomas, Block Ian, et al. High Frequency Wideband Permittivity Measurements of Biological Substances Using Coplanar Waveguides and Application to Cell Suspensions [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2008: 915—918.
- [8] Seo Sanghyun, Stintzing Thomas, Block Ian, et al. High Frequency Wideband Permittivity Measurements of Biological Substances Using Coplanar Waveguides and Application to Cell Suspensions [J]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2008: 915—918.

收稿日期:2021—01—15

### 作者简介:



孙明峰(1994—),男, 四川大学电子信息学院应用电磁研究所读硕士研究生, 研究方向为介电常数测量与应用; E-mail: sun\_mingfeng@126. com。

(上接第 22 页)

### 作者简介:

官继红(1974—),男,高级工程师,毕业于华南理工大学,主要研究数字化变频微波源变换技术;E-mail:gjhme@megmeet. com。