

用天线阵测量圆柱过模波导中虚阴极振荡器产生的高功率微波模式和功率*

李少甫¹, 缪铁莺², 张桂荣², 于爱民², 龚海涛²

(1. 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍在圆柱过模波导中虚阴极振荡器产生高功率微波实验中用天线阵测量微波模式的原理和方法。测量微波模式对研究高功率微波产生的机理具有重要意义。结合在圆柱过模波导壁上安装小电探针天线和小磁环天线测量微波模式的方法,用天线阵测量圆柱过模波导中开口辐射的电磁场空间分布。应用最小二乘法优化原理拟合高功率微波模式功率分布。用天线阵测量了圆柱过模波导中虚阴极振荡器产生高功率微波混合模式功率分布。

关键词: 过模波导; 虚阴极振荡器; 天线阵; 混合模式; 微波模式测量

中图分类号: TN73 **文献标识码:** A

在高功率微波产生器中,为了提高功率容量和效率,微波管往往采用过模波导。强流电子束在过模波导中可能激励多种微波模式。测量微波模式对研究高功率微波产生的机理极为有意义。

有多种方法可测量微波模式^[1~3],例如 N. M. Bykov^[1]利用辐射微波照射空气放电管阵列来测量微波模式。S. H. Gold^[2]把一板形充低压放电气体容器放置微波输出口,利用微波在低压放电气体中的电击穿来测量微波模式。较为简单的方法是在圆柱过模波导壁上安装小电探针天线和小磁环天线。通过测量 TE 波磁场轴向分量 H_z 可以判断过模波导中是否有 TE 波微波模式。通过测量 TM 波磁场圆周切向分量 H_ϕ 沿圆周的对称性可以判断过模波导中是否有非对称 TM_{mn} 波微波模式。但是该方法对具体的混合微波模式分布,须通过测量圆柱过模波导开口辐射场的空间分布来测量微波模式。本文试图运用这种方法测量高功率微波器件中微波模式。

1 测量原理

1.1 金属圆波导内电磁场分布

横截面半径为 a 的金属圆波导电磁场内分布为^[4]:

对 TM 波

$$H_z = 0 \tag{1}$$

$$E_z = \frac{2}{mn} \cos m\phi J_m(\frac{mnr}{a}) e^{-j mnz} \tag{2}$$

$$E_r = -\frac{m}{r} H_\phi = -j \frac{m}{mn} \cos m\phi J_m(\frac{mnr}{a}) e^{-j mnz} \tag{3}$$

$$E_\phi = -\frac{m}{r} H_r = j m \sin m\phi \frac{J_m(\frac{mnr}{a})}{r} e^{-j mnz} \tag{4}$$

式中的 E_z, E_r, E_ϕ 分别是电场 z, r, ϕ 分量;其中 H_z, H_r, H_ϕ 分别是磁场 z, r, ϕ 分量; mn 是相速; J_m, J_m' 为柱贝塞尔函数

$$J_m(\frac{mna}{a}) = 0 \tag{5}$$

对 TE 波

$$E_z = 0 \tag{6}$$

$$H_z = \frac{2}{mn} \cos m\phi J_m(\frac{mnr}{a}) e^{-j mnz} \tag{7}$$

* 收稿日期:2002-11-01; 修订日期:2003-04-23

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:李少甫(1966-),男,在读博士,主要从事微波技术及应用方面的研究;北京 8009 信箱;E-mail:shaohu-li2000@yahoo.com.cn.

$$H_r = -\frac{mn}{\mu} E_\phi = -j m n \cos m\phi J_m(\frac{mn}{R}r) e^{-j m\phi} e^{-j m\phi} \quad (8)$$

$$H_\phi = \frac{mn}{\mu} E_r = j m n \sin m\phi \frac{J_m(\frac{mn}{R}r)}{r} e^{-j m\phi} e^{-j m\phi} \quad (9)$$

$$J_m(\frac{mn}{R}a) = 0 \quad (10)$$

可见在波导壁上, TM 波磁场轴向分量为零, TE 波磁场轴向分量 H_z 不为零, 通过测量 TE 波磁场轴向分量 H_z 可以判断过模波导中是否有 TE 波微波模式。通过测量 TM 波磁场圆周切向分量 H_ϕ 沿圆周的对称性可以判断过模波导中是否有非对称 TM_{mn} 波微波模式。

1.2 圆柱过模波导微波开口辐射场的空间分布

电磁场在波导开口处有反射, 一般会激励高阶模式。但是对于过模波导, 横截面半径 a 远大于波长时, 电磁场在波导开口处的反射几乎为零, 激励的高阶模式也几乎为零。假定波导开口处的电磁场分布与波导内的电磁场分布相同是非常好的近似。在这种假定下利用矢量惠根斯原理由开口处场分布求得电磁场辐射远场分布为^[4]:

对 TE 波

$$E = j^{m+1} \frac{m}{2R} \mu (1 + \frac{mn}{k} \cos \phi) J_m(\frac{mn}{R}a) \frac{J_m(k a \sin \theta)}{\sin \theta} \sin m\phi e^{-j k R} \quad (11)$$

$$E_\phi = j^{m+1} \frac{k a}{2R} \mu (\frac{mn}{k} + \cos \phi) \frac{J_m(\frac{mn}{R}a) J_m(k a \sin \theta)}{1 - (\frac{mn}{k \sin \theta})^2} \cos m\phi e^{-j k R} \quad (12)$$

式中 k 是电磁场在自由空间的波数; R, θ, ϕ 分别是以波导口平面为 x, y 平面, 波导口圆心为原点的球坐标系中远场处的球坐标; E, E_ϕ 分别是辐射场的 r, ϕ 分量。

对 TM 波

$$E = -j^{m+1} \frac{k a}{2R \sin \theta} \frac{mn}{k} (\frac{mn}{k} + \cos \phi) \frac{J_m(k a \sin \theta) J_m(\frac{mn}{R}a)}{1 - (\frac{mn}{k \sin \theta})^2} \cos m\phi e^{-j k R} \quad (13)$$

利用天线阵测量圆柱过模波导中虚阴极振荡器产生的高功率微波模式和能量的原理是, 用天线阵测量辐射场的空间分布, 然后通过(11), (12), (13)式和数据拟合得到微波模式分布。沿球面积分辐射场的功率得到辐射场的总能量。

下面讨论 TM 波的模式分布, 定义特定 TM_{mn} 波的模式远场场强 E 功率归一化场分布为 $f_{mn}(\theta, \phi)$, 它与场强 E 的关系是

$$f_{mn}(\theta, \phi) = E / \sqrt{p_t} \quad (14)$$

$$p_t = \iint E^2 ds / 2 \quad (15)$$

其中积分 \iint 是微波辐射远场球面, $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 是自由空间电磁场阻抗, 定义微波辐射的功率为 P , 各微波模式的功率分布为 d_{mn} , 则各微波模式的功率 P_{mn} 为

$$P_{mn} = d_{mn} P \quad (16)$$

在远场区球半径为 R 的球面上 P 点测得的场强为 $E(\theta, \phi)$, 各微波模式的功率分布为 d_{mn} , 各微波模式的相对相位可能不一致, 设为 ϕ_{mn} , 则

$$E(\theta, \phi) = \sum_{mn} \sqrt{d_{mn}} e^{j \phi_{mn}} f_{mn}(\theta, \phi) \quad (17)$$

式中 $f_{mn}(\theta, \phi)$ 是微波 mn 模式辐射归一化场分布。

根据(17)式可以用实验数据拟合高功率微波模式分布。

2 实验装置

在圆柱过模波导中虚阴极振荡器实验中, 仔细调整电子束的位置, 使之位于轴心位置, 此时由于对称性, 虚阴极振荡器只产生 TM 波。通过波导壁上安装小电探针天线和小磁环天线测量可以证实波导中只产生 TM 波,

而且是具有轴对称性的 TM_{0n} 模式。轴对称性的 TM_{0n} 模式的辐射场的空间分布也是轴对称性的,这样可以减少测量天线阵的阵元个数。

实验中采用图 1 所示的实验装置。测量天线阵由位于半径为 R 的圆弧上的标准宽带喇叭组成,微波信号经过滤波器,衰减器,一路经检波后由高速数据记录仪记录,一路由频率仪器测量频率。图中未画波导壁上安装小电探针天线和小磁环天线,以及测量装置。实验时,首先用小电探针天线和小磁环天线,测量和调整电子束的位置,使得波导中只产生具有轴对称性的 TM_{0n} 模式微波。此时虚阴极振荡器具有较高的微波产生效率。对于 TM_{0n} 模式微波模式测量,位于 $\pi/2$ 空间上的天线阵能够满足测量要求。天线阵元喇叭间的隔离度大于 20 到 30dB。

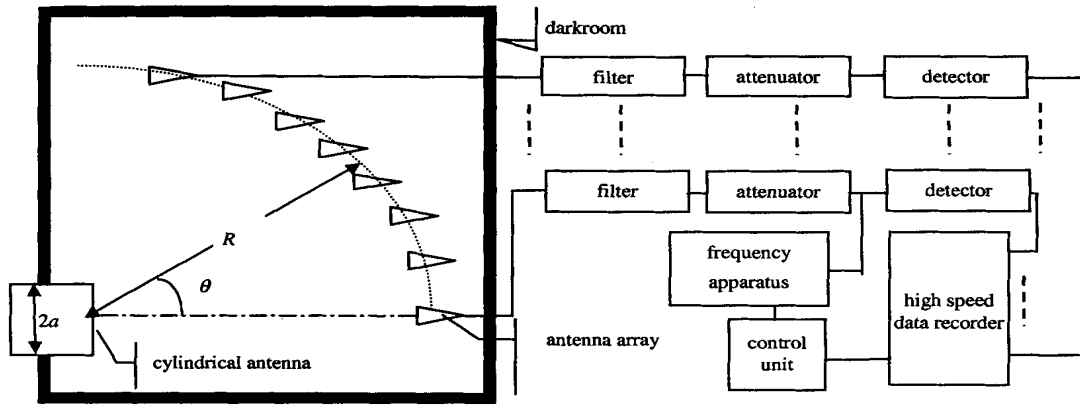


Fig. 1 Schematic of diagnosis on the modes distribution and energy system
图 1 用天线阵测量圆柱过模波导中开口辐射场的空间分布原理框图

3 数据处理

令各测量天线阵的阵元位置分别为 θ_i , 实验测得场强幅度为 $E_e(\theta_i)$, 各微波模式的功率分布为 d_{0n} , 各微波模式的相位分布为 ϕ_{0n} 。应用最小二乘法优化原理, 所求 d_{0n} 和 ϕ_{0n} 应使下式为最小值。

$$\sum_i [E_e(\theta_i) - |E(\theta_i, \phi)|]^2 = \sum_i [E_e(\theta_i) - \left| \sum_n \sqrt{d_{0n}} e^{j\phi_{0n}} f_{0n}(\theta_i) \right|^2]^2 \quad (18)$$

其中 $0 \leq d_{0n} \leq 1; 0 \leq \phi_{0n} \leq 2\pi$ 。

如果各微波模式的相位分布相同, 则以上问题为二次优化问题, 它有唯一的全局解, 有很多种方法求解。对于一般情况是非线性最小二乘法优化, 可以应用非线性规划算法。我们采用了 Gauss-Newton 法和 Levenberg-Marquardt 法求解。

4 实验结果

单端半反射谐振腔实验是在以电感贮能作能源的加速器装置上进行的。单端反射谐振腔的半径为 21cm, 长为 77cm。单端半反射谐振腔 VCO 振荡器产生的微波, 用 8 个喇叭接收, 测量空间功率密度分布。

表 1 单端半反射谐振腔 VCO 模式分布测量实验结果

Table 1 Experiment result of power distribution of the mix modes of the vircator microwave source

No.	U/ kV	I/ kA	f/ GHz	P/ MW	A ₀₁ / %	A ₀₂ / %	A ₀₃ / %
1	390	12.5	2.5	102	0.5	24	75.5
2	426	13.3	2.5	104	2.8	5.8	91.4
3	378	11.5	2.5	49	2.3	16.7	81.0
4	365	11.4	2.5	35	3.4	28.6	68

表 1 是单端半反射谐振腔 VCO 实验结果。表中 A_{01}, A_{02}, A_{03} 分别对应 $TM_{01}, TM_{02}, TM_{03}$ 波所占的百分比, 其中 V, I 分别是电子束电压和电流。在实验中辐射微波频率较为稳定单一, 说明谐振腔实现了 VCO 的频率锁定。实验结果表明 TM_{03} 模式所占的比例很大。实验结果表明, VCO 振荡器在谐振腔中激励起多种模式。模式竞争是降低微波产生效率的因数之一。通过改进谐振腔的结构, 消除模式竞争, 可以进一步提高微波产生效率。

5 结 论

本文建立了一套天线阵测量微波模式的实验装置,并用它测量了圆柱过模波导中虚阴极振荡器产生高功率微波混合模式功率分布。

实验结果的误差主要来自于理论分析误差、实验测量误差和数据处理误差。理论分析误差,主要是假定电磁场在波导开口处激励的高阶模式几乎为零,波导开口处的电磁场分布与波导内的电磁场分布相同。通过冷腔测试,这种假定是非常好的近似。实验测量误差是指天线和测量线路标定和精度所引起的误差。数据处理误差是由数据处理引起的误差,可通过增加天线以减小误差。

致 谢 本工作得到周传明研究员、丁伯南研究员、孙承纬研究员的指导,周纪文高工提供了微波冷测的全部实验条件。高生寿领导的实验小组运行加速器为 VCO 实验提供了能源。杜祥琬、丁武对论文提出了有益的建议。在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Bykov N M, Gubano V P, Gunin A V, et al. Diagnosis of high-power nanosecond pulse of microwave radiation[R]. Priory I Tekhnika Eksperimenta, 1987. 107.
- [2] Gold S H, Black W M, Granatstein V L, et al. Breakdown of the atmosphere by emission from a millim wave free electron maser[J]. Appl Phys Lett, 1983, 43: 922.
- [3] Benford J, Swegle J. High-power Microwave[M]. Artech House, 1992. 134.
- [4] 西尔弗. 微波天线理论与设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1989. (Xerf S. Theory and design of microwave antenna. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1989)

Mode distribution and power diagnosis of the high power microwave from vircator with the antenna array

LI Shao-fu¹, MIAO Te-ying², ZHANG Gui-rong², YU Ai-min², CONG Hai-tao²

(1. Graduate School of CAEP, Beijing 100088, China;

2. Institute of Applied Electronic, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The principle and method of using antenna array to diagnose the mode distribution, which is used in the experiment of high power microwave radiation of half reflected over mode circular cavity vircator, is introduced. Diagnosis of the modes is very useful to understand the vircator and enhance the output microwave power and the efficiency of the device. The small electric antenna and small magnetic antenna on the surface of circular waveguide are also used to diagnose the modes, which are combined in the antenna array to diagnose the space distribution of the radiation of the open end of over mode circular waveguide. The least square optimization formula is used to fit the mode distribution to the space distribution data. The power distribution of the mix modes of the vircator microwave source in the over mode waveguide is obtained.

Key words: Over mode waveguide; Vircator; Antenna array; Mix modes; Mode diagnosis