

# S波段宽带大功率耦合腔行波管冷测实验研究

李文君<sup>1,2;1)</sup> 许州<sup>1</sup> 林郁正<sup>2</sup> 沈旭明<sup>1</sup> 刘婕<sup>1</sup> 陈亚男<sup>1</sup> 黎明<sup>1</sup> 杨兴繁<sup>1</sup>

1 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

2 (清华大学工程物理系加速器实验室 北京 100084)

**摘要** 介绍了一只S波段宽带大功率耦合腔行波管的冷测实验进展. 测量了该管的色散特性、同步电压、耦合阻抗等高频特性参数, 测量结果与模拟值相一致.

**关键词** 耦合腔行波管 冷测实验 色散特性 耦合阻抗 同步电压

## 1 引言

耦合腔行波管<sup>[1]</sup>(coupled-cavity traveling-wave tube, CCTWT)能在宽频带内提供大功率微波输出, 在高功率雷达、大功率通信设备等众多军事及民用领域有广泛的应用. 针对实际需求, 我们设计<sup>[2]</sup>了一只S波段宽带大功率连续波耦合腔行波管, 该管的慢波结构采用单槽交叉耦合腔结构<sup>[3]</sup>(即休斯结构), 其设计性能如表1示. 表1相应的行波管工作参数为: 腔数24、电子枪电压16.2kV、电子束电流1.5A、约束磁场0.06T、微波输入功率80W.

表1 S波段宽带大功率连续波耦合腔行波管的设计性能

工作频带 /MHz	CW输出 功率/kW	电子 效率/%	-1dB带宽 /%
2000~2350	> 5.5	> 23	16.9

根据设计方案, 加工了一只S波段无氧铜耦合腔行波管, 开展了冷测实验研究工作, 测量了管型的色散特性、耦合阻抗等高频特性参数, 为下一步开展大功率热测实验打下了基础. 本文介绍该S波段行波管的冷测实验进展, 图1为该管的实物照片.

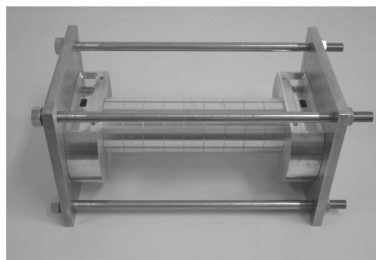


图1 S波段无氧铜耦合腔行波管腔链

## 2 色散特性测量

采用谐振法<sup>[4]</sup>测量色散特性. 当 $N$ 腔耦合腔链两端短路形成谐振系统时, 腔通带在 $\pi \sim 2\pi$ 区间共有 $N$ 个本征模式, 相应的单腔相移 $\theta$ 依频率由低到高的次序为 $\theta = (N-1)\pi/(N-1), (N)\pi/(N-1), \dots, (2N-2)\pi/(N-1)$ ; 槽通带在 $\pi \sim 2\pi$ 区间有 $(N-1)$ 个模式(少一个 $2\pi$ 模式<sup>[2, 5]</sup>), 相应的单腔相移 $\theta$ 依频率由低到高的次序为 $\theta = (2N-3)\pi/(N-1), (2N-4)\pi/(N-1), \dots, (N-1)\pi/(N-1)$ .

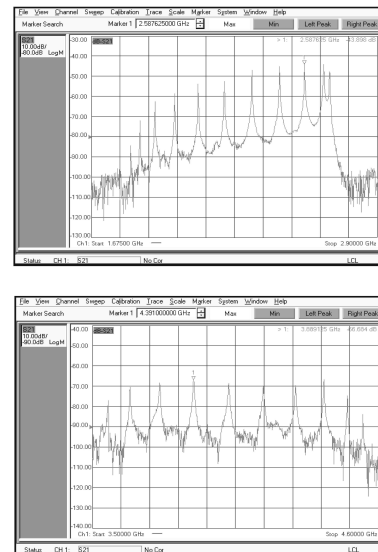


图2 11腔行波管腔链的谐振模式  
(上图: 腔通带模式; 下图: 槽通带模式)

选择11个单腔组成谐振腔链进行了实际测量, 测量结果示于图2. 读出图2中各谐振峰的谐振频率,

2008-01-07 收稿

1) E-mail: liwenjun@tsinghua.org.cn

作色散特性曲线如图3示,图3表明腔通带在1.84—2.70GHz,槽通带在3.56—4.54GHz.图3还给出相应的模拟色散曲线<sup>[2]</sup>进行比较,图3中实验色散曲线与模拟曲线重合良好,其中,腔通带各模式的平均测量误差为0.9%,槽通带各模式的平均测量误差为0.6%.

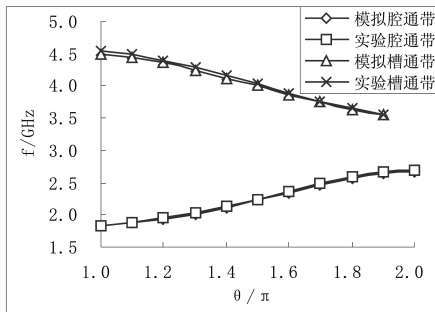


图3 S波段耦合腔行波管的色散曲线

由图3的实测色散曲线计算出腔通带各模式的实验同步电压示于图4,图4还给出了由模拟色散曲线计算的模拟同步电压.图4的实验曲线与模拟曲线基本一致,在同一频率点两者给出的同步电压相差250—350V,在后续的大功率热测实验中这一差别不会影响行波管的放大性能,实验中可通过微调电源电压实现微波功率的放大.

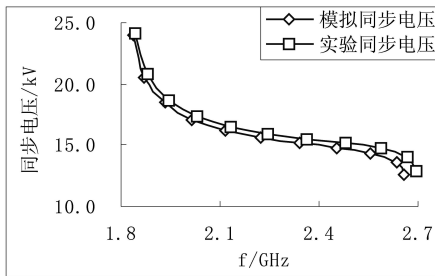


图4 实验同步电压与模拟同步电压的比较

### 3 耦合阻抗测量

采用微扰法<sup>[4]</sup>测量耦合阻抗,测量过程为:首先测出微扰前耦合腔链各模式的谐振频率,然后在腔链轴线上放置微扰介质棒测量微扰后的谐振频率,根据两者的频率差计算被测腔链的耦合阻抗.对于休斯结构,腔链工作在-1次空间谐波,因此关心的是-1次空间谐波的耦合阻抗值 $K_{-1}$ .文献[2]推导给出了 $K_{-1}$ 的表达式<sup>[2]</sup>,如式(1)示:

$$K_{-1} = \zeta_{-1} / \zeta_0 \times [2(f_{new} - f) / (1 - \epsilon_r) / (\pi b^2 \beta_0^2 v_g \epsilon_0 f)] \quad (1)$$

式(1)右端中括号内为0次空间谐波(即基波)的耦合阻抗, $\zeta$ 为修正因子, $m$ 次空间谐波的 $\zeta_m$ 因子为

$$\zeta_m = \frac{\sin^2(\beta_m g / 2) I_0^2(\gamma_m b) - I_1^2(\gamma_m b)}{\beta_m^4 I_0^2(\gamma_m R1)} \quad (2)$$

式(1),(2)中各项的意义如下: $f, f_{new}$ 分别为微扰前后的本征频率, $\epsilon_0, \epsilon_r$ 分别为真空介电常数和微扰介质的相对介电常数, $b, R1$ 分别为介质棒半径和耦合腔链的束通道半径, $g$ 为腔链鼻锥间隙的大小, $\beta_m, \gamma_m$ 分别为腔链 $m$ 次空间谐波的纵向相移常数和横向传播常数, $I$ 为贝塞尔函数.

式(1)中,需要测量的参数有 $f, f_{new}, \epsilon_r$ .实验选用聚四氟乙烯介质软线为微扰体,经实际测量,该微扰体在S波段的 $\epsilon_r$ 为2.2<sup>[2]</sup>.腔通带各本征模式微扰前后的谐振频率 $f, f_{new}$ 的测量结果示于表2.

表2 腔通带各本征模式谐振频率的实验测量结果

模式的单腔相移 $\theta/\pi$	$f$ /MHz(微扰前)	$f_{new}$ /MHz(微扰后)
1.0	1841.625	1840.250
1.1	1881.500	1880.125
1.2	1946.125	1944.575
1.3	2030.000	2028.450
1.4	2130.375	2128.600
1.5	2241.750	2239.750
1.6	2360.000	2357.375
1.7	2476.875	2474.125
1.8	2582.750	2579.575
1.9	2663.875	2660.175
2.0	2692.750	2690.300

将表2的测量结果代入式(1)进行计算,从而得到各模式的实测 $K_{-1}$ 值.将测得的不同模式的 $K_{-1}$ 值作成曲线示于图5,同时给出相应 $K_{-1}$ 值的模拟结果进行比较.图5曲线表明腔通带各本征模式的耦合阻抗值在8—66 $\Omega$ 之间,其中2.0—2.35GHz工作频带内的耦合阻抗值为11—24 $\Omega$ .图5中 $K_{-1}$ 的模拟值与实验值基本一致,两者相差约3%.

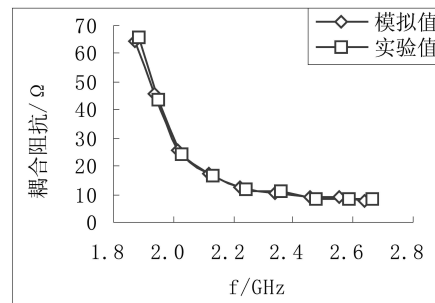


图5 S波段行波管-1次空间谐波的耦合阻抗 $K_{-1}$

### 4 结论

根据S波段宽带大功率耦合腔行波管的设计方案,加工了一只S波段无氧铜耦合腔行波管,开展了冷测实验研究工作,测量了管型的色散特性、耦合阻抗等高频特性参数.测量结果与模拟值相一致,其中腔通带色散特性、槽通带色散特性、腔通带耦合阻抗的测量误差分别为0.9%,0.6%,3%.进而,由腔通带色散特性的测量值和模拟值分别计算相应的同步电压,

两者的计算结果相差约 250—350V. 在后续的大功率热测实验中, 这一差别不会影响行波管的放大性能, 实验中可通过微调电源电压实现微波功率放大. 行波

管高频特性参数的准确测量为下一步开展大功率热测实验打下了基础.

### 参考文献(References)

- 1 Gilmour A S. Principles of Traveling-Wave Tubes. Artech House, 1994
- 2 LI Wen-Jun. Theoretical and Experimental Research on S-Band Broadband High Power Continuous Wave Coupled-Cavity Traveling-Wave Tube [doctor thesis]. Beijing: Tsinghua University, 2007 (in Chinese)  
(李文君. S波段宽带大功率连续波耦合腔行波管理论及实验研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2007)
- 3 YANG Xiang-Lin et al. Principles of Microwave Devices. Beijing: Electronic Industry Press, 1994 (in Chinese)  
(杨祥林等. 微波器件原理. 北京: 电子工业出版社, 1994)
- 4 ZHANG Zhao-Tang. Measurements on High Frequency Systems of Microwave Tubes. Beijing: National Defence Industry Press, 1982 (in Chinese)  
(张兆铿. 微波管高频系统的测量. 北京: 国防工业出版社, 1982)
- 5 Kantrowitz F, Tammaru I. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, **35**(11): 2018—2026

## Cold-Test Experimental Research of an S-Band Broadband High Power CCTWT

LI Wen-Jun<sup>1,2;1)</sup> XU Zhou<sup>1</sup> LIN Yu-Zheng<sup>2</sup> SHEN Xu-Ming<sup>1</sup> LIU Jie<sup>1</sup>  
CHEN Ya-Nan<sup>1</sup> LI Ming<sup>1</sup> YANG Xing-Fan<sup>1</sup>

1 (Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

2 (Accelerator Lab., Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Cold-test experiment of an S-band broadband high power coupled-cavity traveling-wave tube (CCTWT) is introduced in this paper. The dispersion characteristic, the synchronous voltage and the interaction impedance of this S-band CCTWT are measured. The experimental results are in agreement with the numerical simulation values.

**Key words** coupled-cavity traveling-wave tube, cold-test, dispersion characteristic, interaction impedance, synchronous voltage

Received 7 January 2008

1) E-mail: liwenjun@tsinghua.org.cn