

# 有源微波器件测试干扰因素及抗干扰对策

程婷婷 张一治 任翔 李静 常慧娟 马帅帅 肖苗苗

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京, 100854)

**摘要:**为提高有源微波器件测试的器件无损性、测试正确性、测试稳定性、结果正确性和测试速动性,保障航天航空产品、通讯产品和武器整机系统的可靠性和稳定性,识别有源微波器件测试的干扰因素,规避其恶劣影响变得日益重要。本文根据有源微波器件的测试原理,结合有源微波器件的测试要求,找到了严重威胁有源微波器件正常测试的 8 项干扰因素,并针对这 8 项干扰因素逐一找到了可行的抗干扰对策,对有源微波器件测试具有很深的实践指导意义。

**关键词:**有源微波器件; 干扰因素; 抗干扰因素对策

**中图分类号:**TN98      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2018)S2-0084-05

## Testing Interference Factors of Active Microwave Devices and Anti-interference Countermeasures

CHENG Tingting, ZHANG Yizhi, REN Xiang, LI Jing,  
CHANG Huijuan, MA Shuaishuai, XIAO Miaomiao

(Aerospace Science and Industry Defense Technology Research Testing Center, Beijing, 100854, China)

**Abstract:** In order to improve the integrity, correctness, stability and fast of the active microwave device test, ensure the reliability, stability of aerospace products communication products, weapon whole system, it is important to identify the interference factors and avoid the bad influence. According to the testing principle of active microwave devices, combined with the testing requirement of active wave devices, the interference factors of 8 serious threat tests are found and feasible anti-interference countermeasures are found, which has deep guiding significance for testing.

**Key words:** active microwave devices; interference factors; anti-interference countermeasures

目前,随着电子技术的发展,航天航空产品、通讯产品和武器整机系统逐渐向小型化、轻量化、多功能、可靠性和长寿命的方向发展,有源微波器件的使用变得日益频繁。

由有源微波器件组成的航天航空产品、通讯产品和武器整机系统对功能和指标有很高要求,对构成产品、系统的有源微波器件功能和技术指标也有很高要求,因此元器件制造商、设计工程师和测试工程师需要对每只有源微波器的性能进行规划和参数测试。

然而有源微波器件性能测试易受到各种因素

的干扰,因此要想正确识别测试过程、判断测试结果,找到干扰因素和抗干扰对策变得日益重要。

## 1 有源微波器件测试要求

### 1.1 有源微波器件测试原理

目前,常用的有源微波器件有很多种,有放大器、混频器、开关、数字衰减器和压控振荡器等,有源微波器件的测试通常以图 1 的方式进行,如图 1 所示,被测器件(Device under test, DUT)被放置于测试夹具上,由电源为器件供电,同时由网络分析仪或信号发生器、信号源等仪器设备为夹具和器

收稿日期:2018-03-23;修订日期:2018-05-30

通信作者:程婷婷,女,工程师,E-mail:ctt01071801@163.com。

引用格式:程婷婷,张一治,任翔,等.有源微波器件测试干扰因素及抗干扰对策[J].南京航空航天大学学报,2018,50(S2):84-88. CHENG Tingting, ZHANG Yizhi, REN Xiang, et al. Testing interference factors of active microwave devices and anti-interference countermeasures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2):84-88.

件提供高频输入信号,由网络分析仪或频谱分析仪、功率计等仪器设备获取测试夹具和器件的输出信号,得到测试结果<sup>[1-3]</sup>。

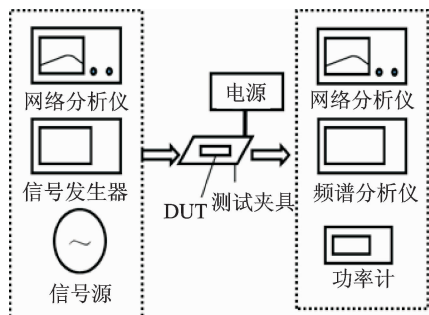


图 1 有源微波器件测试原理图

Fig. 1 Test principle diagram of active microwave device

## 1.2 有源微波器件测试要求

有源微波器件具有多样化、小型化和精细化的特点,对于有源微波器件的测试要求也随之提高。作为器件质量的有力保障,有源微波器件必须满足以下要求:

(1) 器件无损性。有源微波器件一经测试合格,便会用于组件、部件及产品安装中,因此在测试过程中必须保证有源微波器件无损伤,才能保证装配好的组件、部件及产品无质量隐患。

(2) 测试正确性。有源微波器件的测试需要反映器件工作时的性能及状态,因此只有整个测试过程正确操作,才能获取到器件真实的性能及状态。

(3) 测试稳定性。由于有源微波器件在组件、部件及产品中发挥功能是一个持续的过程,因此在测试时,测试状态必须是一个稳定可持续的状态,才能获取到器件持续工作时的性能状态。

(4) 结果准确性。有源微波器件的测试结果通常由测试工程师根据矢量网络分析仪、频谱分析仪和功率计等测试仪器设备获取的指标曲线来判定测试结果,判定的测试结果直接决定器件是否被正常使用,因此测试结果必须正确。

(5) 测试速动性。当大批量有源微波器件需要测试时,测试速率会直接影响测试周期,测试周期过长,会影响后期的装调周期,因此需要保证测试速动性。

## 2 有源微波器件测试干扰因素

在有源微波器件测试中,测试正常化运行一直是测试工程师全力保障的重点,其有着不言而喻的意义。然而测试过程涉及测试仪器设备使用、器件与夹具装调、线缆电路连调、测试工程师调试和测试环境控制等多个环节,因此常有多种干扰因素影响测试准确性。这就需要找到这些干扰因素,并且

针对性地找出避免干扰的解决方案。本文找到有源微波器件测试的干扰因素有以下 8 项。

### (1) 仪器设备工作状态异常对测试的干扰

有源微波器件测试常用矢量网络分析仪、频谱分析仪、功率计、脉冲信号源、信号发生器和直流电源等仪器设备。这些仪器设备状态异常会导致测试结果错误,严重的会损坏测试夹具及器件。例如在使用矢量网络分析仪测试微波放大器时,输入功率设置不当会对矢量网络分析仪造成伤害。矢量网络分析仪校准不当会影响测试效果,例如校准时忽略设置中频带宽,测试有源微波器件时,校准后的曲线测量速度会很快,而且抖动较大,会给测试带来困难。因此这种干扰的影响是最直接的,需要规避。

### (2) 测试校准件使用、存放不当对测试的干扰

有源微波器件测试校准件是根据测试夹具设计而成,校准件使用不合理会直接影响测试精度,使用、保存不当会减少校准件寿命,增加校准误差,这种干扰因素虽然在单次测试中影响不大,但持续时间长,并且会随着校准件磨损变得日益严重。

### (3) 测试夹具与仪器设备、被测器件阻抗不匹配对测试的干扰

有源微波器件测试时测试夹具通常通过电缆组件与矢量网络分析仪、信号发生器、频谱分析仪等高频仪器设备相连,测试夹具通常与有源微波器件采用压接方式相连,通常情况下有源微波器件、测试夹具、电缆组件和高频仪器设备的阻抗皆为  $50 \Omega$ ,才具备匹配要求。

在有源微波器件测试时,阻抗匹配与否直接影响输入输出信号质量优劣。例如在高频仪器设备输出端是在特定负载条件下设计的,负载条件改变,仪器设备会达不到特有性能。在测试夹具与测试器件压接部分,传输线和负载阻抗不匹配,信号会在负载端发生反射,使能量传递不过去,形成驻波,导致传输线有效功率降低,阻碍功率发射,损坏仪器设备,还会在测试夹具 PCB 板上产生振荡、辐射干扰。

### (4) 有源微波器件引线不符合共面性对测试的干扰

有源微波器件封装多为表面贴装器件(Surface mounting devices, SMD),封装引出端多采用表面贴装技术(Surface mounting technology, SMT)。这样封装的器件在二次筛选中需要注意。以 M/A-COM 公司生产的数控衰减器 MAAD-007086-000100 和 MINI 公司生产的微波放大器 ERA-5<sup>+</sup> 为例,如图 2 所示,左边器件为 MAAD-007086-000100 示意图(MAAD-007086-000100 器件实为 24 线器件),右边器件为 ERA-5<sup>+</sup> 示意图。

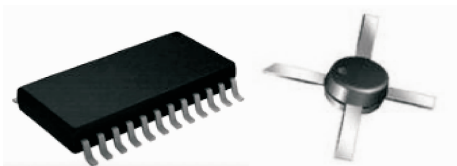


图2 MAAD-007086-000100 和 ERA-5+封装示意图

Fig.2 Package schematic diagram of MAAD-007086-000100 and ERA-5+

在实际测试时,这两款器件全部引线末端需与放置平面共面,才能保证测试正常。然而当有源微波器件引线数量大,节距小时,器件引线如果不符合共面性,器件部分引线无法与夹具完全连接,输入输出信号无法正常传输,直接导致测试无法进行。另外由于在有源微波器件测试时器件持续处于通电状态,射频信号通路异常,也有损伤器件的可能。这种干扰对有源微波器件测试影响严重,不易察觉。

#### (5) 试验室环境温度对测试的干扰

试验室温度是有源微波器件测试的一个干扰因素,由于器件工作温度范围通常较宽,所以通常情况下其对测试的影响是微乎其微的,但在测试具有温补功能的有源器件时,影响较大。

#### (6) 试验室环境湿气对测试的干扰

试验室环境湿气是微波测试的一个隐形干扰,其不易察觉,但切实存在。对于有源微波器件测试,湿气易对测试夹具、测试校准件、电缆组件和射频转接器造成影响。在湿气影响下,测试夹具、测试校准件、电缆组件和射频转接器性能指标会发生偏移,导致测试产生误差。这种干扰具有潜在性和偶然性,对测试影响可大可小。

#### (7) 工程师测试操作对测试的干扰

由于有源器件较无源器件功能更加复杂,所以单只有源微波器件的测试时间相对较长。测试时,工程师需要测试校准、搭接测试网络、压接、定位器件、供电控制、读取测试图像和判定测试结果等,才能完成测试。不同工程师对同样有源器件测试有时会出现不同结果,见图3,不同工程师在调整器件压接柱时,位置不同,松紧不同,这种区别常常影响器件的测试。工程师不易察觉这种干扰,容易误判测试结果。

#### (8) 有源微波器件个体差异对测试的干扰

有源微波器件测试通常是针对同批次一定数量的器件,有时个别器件测试图像与其他器件迥异,本文称这种情况是器件个体差异性。这样的个体差异会影响工程师的判断,究竟是器件性能异常,还是测试过程异常,需要工程师逐项排查,找出

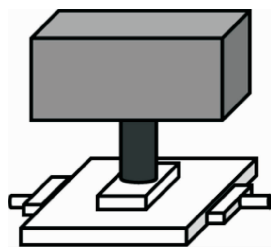


图3 测试夹具与器件压接图

Fig.3 Test fixture and device compression diagram

真相。这种干扰无可避免,影响严重,会诱使工程师做出误判。

### 3 有源微波器件测试的抗干扰对策

综合考虑,这些干扰因素对有源微波器件的测试具有致命影响,如不规避,会给航天航空产品、通讯产品和武器整机系统制造隐患,所以在明确有源微波器件测试的8项干扰因素后,找到可行的抗干扰对策才是重中之重。针对这8项干扰因素,本文逐项找到了可行的抗干扰对策。

#### (1) 正确使用仪器设备,及时计量,保养仪器设备

有源微波器件测试仪器设备状态异常是最直接的干扰因素,也容易被规避。针对其干扰对策有:严格按照仪器设备操作规程正确操作、使用仪器设备;按照各级规范定期计量,保养仪器设备;对仪器设备定期清洁,安全接电、断电。

有时也通过外接部件保护仪器设备,如图4,5。测试微波放大器时,可以在信号源外接隔离器保护信号源,在微波放大器输出端接入衰减器保护网络分析仪。

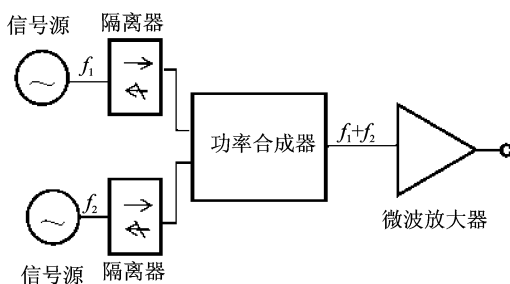


图4 微波放大器输入端外接隔离器

Fig.4 Input terminal isolator of microwave amplifier

#### (2) 正确使用、存放测试校准件

通常有源微波器件测试校准件包括直通校准件,反射校准件,延时校准件。校准件材料通常是黄铜镀金、聚四氟乙烯和有机玻璃等。针对测试校准件使用、存放不当会干扰测试,抗干扰对策有:使用扭力扳手安装卸载测试夹具;定期用蘸有酒精的棉签清洁校准件表面;测试校准件使用完毕后及时

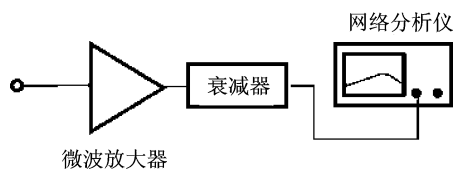


图 5 微波放大器输出端外接衰减器

Fig. 5 Output attenuator of microwave amplifier

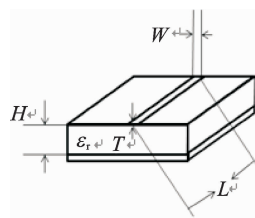


图 7 50 Ω 微带线模型图

Fig. 7 50 Ω micro strip line model

给校准件转接器带上保护帽;将测试校准件放置于防潮容器内,分类保管<sup>[4]</sup>。

### (3)合理设计测试夹具阻抗、测试校准件阻抗

有源微波器件、测试夹具和仪器设备阻抗不匹配对测试的干扰是显而易见的。针对这种干扰的对策是合理设计测试夹具和测试校准件,验证无误后再投产使用。在设计测试夹具和校准件时,需要设计夹具和校准件传输线。测试夹具和校准件的传输线通常为微带线,可以通过式(1)设计。

$$Z_0 = 80 \ln \left[ \frac{1.9(2h+t)}{0.8\omega+t} \right] \times \frac{\left[ 1 - \frac{h}{4(h+c+t)} \right]}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

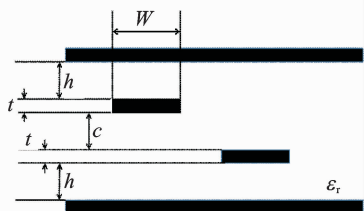


图 6 微带特性阻抗计算模型图

Fig. 6 Model diagram of micro strip characteristic impedance calculation

如图 6,其中  $Z_0$  是传输带线的特性阻抗, $\omega$  是印刷导线的宽度, $t$  是印刷导线的厚度, $h$  是印刷导线与基准面之间的介质厚度, $\epsilon_r$  是绝缘材料的介电常数。

微带线阻抗一般为 50 Ω。见图 7,通常阻抗由微带线宽度  $W$ ,PCB 板介电常数  $\epsilon_r$ ,PCB 板厚度  $H$ ,铜箔厚度  $T$  等参数决定。在材料一定的情况下,特性阻抗只取决于微带线的宽度<sup>[5-6]</sup>。

如果遇到阻抗不匹配的情况,可以使用变压器做阻抗转换,也可以考虑使用串联/并联电感、电容的方法,使阻抗匹配<sup>[7-8]</sup>。

### (4)对表贴有源微波器件引线共面性进行检测

有源微波器件引线不符合共面性对测试的干扰影响严重,不易察觉。针对这种干扰可以采用 SMD 引线共面性检测的方法对器件引线共面性进行检测。目前,国内外针对 SMD 引线共面性检测

的方法常采用 3D 视觉检测法,这是一项先进的检测技术,适用于各类侧面封装的表贴有源微波器件引线共面性检测。如图 8 所示,SMD 引线共面性检测使用图像传感器(Charge coupled device, CCD)相机,采集 SMD 引线平面信息,调用采集的信息及相关算法进行引线宽度、引线间距及引线单片共线性的检测。一经检测合格的器件,测试时将不再受到此干扰影响。对于检测不合格的器件,可经引线矫正后再行检测<sup>[9-10]</sup>。

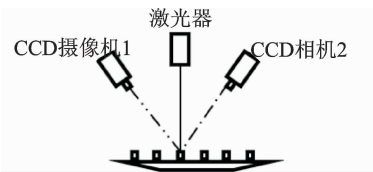


图 8 3D 视觉引线共面性检测原理图

Fig. 8 Schematic diagram of coplanarity detection for 3D visul lead

### (5)合理控制实验室温度屏蔽温度干扰

实验室环境温度对测试干扰影响较小。针对这项干扰的对策是:在实验室安装温度可调控系统,以保证室温基本恒定,减少温度因素干扰<sup>[11]</sup>。

### (6)使用电子防潮柜屏蔽湿气干扰

实验室环境湿气对测试的干扰是潜在的,且影响力大。针对其的抗干扰对策是使用电子防潮柜屏蔽湿气干扰。目前实验室采用蓝士电子防潮柜屏蔽湿气。这种电子防潮柜的额定电压为 110—220 V,平均功率为 48W,控湿范围是 20%—60% RH。使用这种电子防潮柜能够将受湿气影响的测试夹具,测试校准件,电缆组件和射频转接器,还原真实性能。

### (7)微波有源器件测试工程师正确操作、关注细节

在测试有源微波器件时,不同工程师测试操作会有不同的测试状态,这类状况对器件测试的干扰,时有发生,影响力大。针对其抗干扰对策是:测试工程师严格按照操作规程正确进行测试操作,当遇到测试异常时,可以比对不同工程师测试结果,或者比对不同测试机构测试结果,来确定是否受到

了这种干扰的影响,将其规避。

#### (8)对有源微波器件测试差别对待

有源微波器件多为功能较复杂的器件,规避其个体差异性对测试的干扰需要综合考虑。经常有同批次微波放大器,数控衰减器和开关等有源微波器件在测试时,有个别器件测试图像与合格器件不同。对于这种情况,绝不能简单判定其为不合格器件,而要找出图像差异原因,还原器件真实状态。

一般原因是,器件混批,器件引线管脚有污渍,干扰因素影响到了器件测试,器件确实失效等原因。将以上原因逐项排查,基本上能有效解决器件个体差异性带给测试的假象<sup>[12]</sup>。

## 4 结束语

随着测试能力的提高,送筛的有源微波器件日益增多,其测试过程受到干扰因素的影响经常发生,作为测试工程师需要对这些干扰因素有清晰的认识,严格按照抗干扰对策,将这些干扰提前规避,还原器件测试的真实状态。由有源微波器件组成的航天航空产品、通讯产品和武器整机系统对功能和指标有很高要求,其测试中器件无损、测试正确、测试稳定、结果正确、测试速动,对提高航天航空产品、通讯产品和武器整机系统可靠性和稳定性具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 邱云峰,袁帅.微波单片集成电路测试技术研究[C]//航天科工第八届元器件可靠性技术交流会论文集.北京:[s. n.],2017.  
QIU Yunfeng, YUAN Shuai. Microwave monolithic integrated circuit testing technology [C]//Conference on the reliability technology of the 8th component of space science and technology. Beijing:[s. n.],2017.
- [2] 邱云峰.有源微波器件动态测试方法研究[C]//航天科工第七届元器件可靠性技术交流会论文集.贵阳:[s. n.],2016.  
QIU Yunfeng. Research on testing method of active microwave devices [C]//Conference on the reliability technology of the 7th component of space science and technology. Guiyang:[s. n.]:2016.
- [3] 刘东洋.有源微波器件装前检测技术研究[C]//航天科工第七届元器件可靠性技术交流会.贵阳:[s. n.],2016.  
LIU Dong-yang. Research on pre loading detection technology of active microwave devices [C]// Conference on the reliability technology of the 7th component of space science and technology. Guiyang:[s. n.],2016.
- [4] 任翔.浅谈微波测试的TRL校准技术[C]//航天科工第六届元器件可靠性技术交流会.北京:[s. n.],2015.  
REN Xiang. Discussion on the TRL calibration technique of microwave technology [C]//Conference on the Reliability Technology of the 6th Component of Space Science and Technology. Beijing:[s. n.]2015.
- [5] 王子宇.射频电路设计—理论与应用[M].2版.北京:电子工业出版社,2014.  
WANG Ziyu. RF circuit design theory and applications, second edition [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry,2014.
- [6] 董宏发,雷振亚.微波电路基础[M].西安:西安电子科技大学出版社,2010.  
DONG Hongfa, LEI Zhenya. Microwave circuit basis [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press,2010.
- [7] 雷静.非同轴微波器件测试夹具的设计与应用[J].电子元件与材料,2011,30(7):61-63.  
LEI Jin. Design and application of test fixture for non-coaxial microwave devices [J]. Electronic Components and Materials,2011,30(7):61-63.
- [8] 陶峰,黄成,吴建辉.射频阻抗测试夹具建模技术的研究及应用[J].电子器件,2007,30(3):1075-1078.  
TAO Feng, HUANG Cheng, WU Jianhui. Research and application of radio frequency impedance test fixture modeling technology [J]. Electronic Devices, 2007, 30(3):1075-1078.
- [9] 程婷婷.表面贴装微波器件的测试方法探讨[C]//航天科工第六届元器件可靠性技术交流会.北京:[s. n.],2015.  
CHENG Tingting. Discussion on test method of surface mounted microwave devices [C]//Conference on the Reliability Technology of the 6th Component of Space Science and Technology. Beijing:[s. n.],2015.
- [10] 杨城.表贴集成电路引线共面性检测研究[C]//航天科工第八届元器件可靠性技术交流会.北京:[s. n.],2017.  
YANG Cheng. Research on coplanarity detection of the lead line of integrated circuit [C]//Conference on the reliability technology of the 8th component of space science and technology. Beijing:[s. n.],2017.
- [11] Keysight ENA系列射频矢量网络分析仪[M].北京:是德科技教育与培训中心出版,2015:120-128.  
Keysight ENA Series Radio Frequency Vector Network Analyzer [M]. Beijing: Publication by Keysight Centre for Science and Technology Education and Training, 2015:120-128.
- [12] 周春林.微波半导体S参数的测量[J].宇航计测技术,1989,45(3):24-29.  
ZHOU Chunlin. Microwave semiconductor S parameter measurement [J]. Space measurement technology, 1989,45(3):24-29.