

微波部件的微放电效应检测系统

雷卫平 郭荣斌 杨志兴 段志强

(中国电子科技集团公司第四十一研究所 青岛 266555)

摘要:随着航天技术的快速发展,对微波部件载荷的功率容量要求越来越高,部件受微放电效应影响的问题越来越突出,建立有效的微放电检测手段显现的尤为迫切。在此背景下研制了一套微波部件的微放电效应检测系统,主要采用前向/后向功率检测法及调零检测法实现微放电的检测。首先介绍了微放电产生的机理及危害,其次从检测原理、系统的总体设计及调零装置的设计等3方面对系统研制的基本思路进行了阐述,最终通过实验验证表明系统能够良好的实现单载波状态下无源微波部件的微放电效应检测。

关键词:微放电效应;前向/后向功率;调零

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Multipactor effect detection system of microwave component

Lei Weiping Guo Rongbin Yang Zhixing Duan Zhiqiang

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

Abstract: With the rapid development of space technology, the requirement of power capacity for microwave component loading is higher. Meanwhile, the affection by the Multipactor effect is becoming more prominent. So, the establishment of effective Multipactor detection means is particularly important. In this context, we have developed a set of Multipactor monitoring system. In this system, the forward/reflected power detection method and the Nulling detection method are used to realize the Multipactor detection. This paper firstly introduces the mechanism and harm of Multipactor effect. Then, the idea of developing the system, the whole system design and Nulling detection principle are described in detail. Finally, the experimental results show that the system is able to realize the Multipactor effect detection of passive microwave components in single carrier state.

Keywords: multipactor effect; forward/reflected power; nulling

0 引言

航天器自设计、研制、生产至在轨运行,会消耗大量的人力、物力及财力,其系统结构复杂,承担着重要的气象观测、军事侦察和资源考察等任务,对国家的发展和民族的进步具有战略性影响。但随着航天器研制复杂性的提高,其在轨故障率明显增加,如2006年统计的我国在轨的25颗卫星共发生过约97次故障,因此增强航天器在轨可靠性成为航天领域重要的关注内容^[1]。微放电效应(简称微放电)又称二次电子倍增效应,是指在真空条件下,自由电子在外加射频场的加速下,在两个金属表面间或单个介质表面上激发的二次电子发射与倍增效应,是一种真空谐振放电现象,是影响空间电子设备可靠性和寿命的一个十分

重要的因素^[2]。

微放电主要发生在航天器微波载荷系统的天线、放大器、滤波器、波导系统、机械开关、高频电缆等内。现今航天器大功率微波部件的峰值功率量级已经达到了kW级以上,伴随着功率量级的不断提高,首先要解决的就是大功率微波部件在真空环境下的微放电问题,若其微放电防护性能未满足要求,其在自身结构尺寸、传输信号频率、传输功率、材料表面二次电子发射系数等参数满足一定条件时,发生的微放电会造成微波系统增益下降、传输性能变坏、信号噪声增大,使微波系统不能正常工作,甚至工作寿命提前结束。在某些情况下还可能会造成微波器部件介质材料、粘接剂等出气,形成局部低真空条件。这时,微波电场可能使低真空环境的气体分子电离,产生功率击穿、

电弧放电等低气压放电现象。当微放电过渡到低气压放电后,气体放电会吸收大量微波功率,产生的高温强电离效应会烧坏微波系统,使航天器出现彻底失效的灾难性故障^[3]。微放电效应造成的损坏如图1所示。因此微波部件载荷在研制、生产到使用每个环节都要做真空微放电的试验测试,以验证微放电防护性能是否满足实际工作要求,保证系统在轨运行的正常性。



图1 微放电效应造成的损坏示意图

随着空间工程技术的快速发展,航天器根据应用用途不同,载荷的种类和复杂程度也各不相同,所应用的微波部件种类越来越多,对性能指标的要求也愈来愈高,随之对高效、可靠、稳定、可追溯的微放电测试需求也愈来愈迫切。在此背景下,开展了微放电效应检测系统的研制工作,主要采用前向/后向功率检测法及调零检测法,同时也可根据微波部件种类的不同,通过改变系统连接方式,采用二次/三次谐波检测法、近载波噪声检测法、相位噪声检测法等实现微放电效应的检测^[4]。本系统的研制,在国内首次实现了整系统的全自动控制与信号监测,实现了实验测试过程的全程回放,提高了试验效率、降低了实验成本,对提高我国航天器大功率微波部件载荷研制的基础保障能力意义非凡。

1 检测原理

在描述微放电测试原理之前首先简单介绍一下影响微放电发生的因素,这是了解微放电测试的前提。其主要包括以下4个方面:1)自由电子的存在(来源空间等离子体、太阳风、金属材料表面场致发射及光电发射等);2)真空条件(卫星所处的轨道空间气压一般都小于 10^{-7} Pa,在此环境下自由电子有较大的平均自由程);3)部件材料的二次电子发射系数;4)部件传输信号频率与缝隙宽度乘积^[5]。前两方面是固有的空间环境因素,后两者是部件本身在设计和生产工艺方面的因素(微放电的防护设计主要从这两方面着手)。因此要开展微放电的实验测试研究,首先需为试验件提供模拟的真空环境及激发微放电发生的自由电子,同时提供大功率激励信号,使试验件处于正

常的工作状态,其次才能采用合适的检测方法实现微放电的测试。

微放电会造成微波部件腔体内部或内外导体间充满倍增电子,这些电子的存在会导致部件传输通道各项分布参数发生变化,改变传输信号的幅相特性^[6]。前向/后向功率检测法及调零检测正是通过监测试验件输入端口反射信号幅度和相位在实验前后是否发生变化,间接实现微放电的测试,主要适用于传输单载波的无源部件,其中调零检测主要是对前向/后向功率检测法的重要补充,可大大提高微放电测试的灵敏度,对检测弱放电现象十分有效。

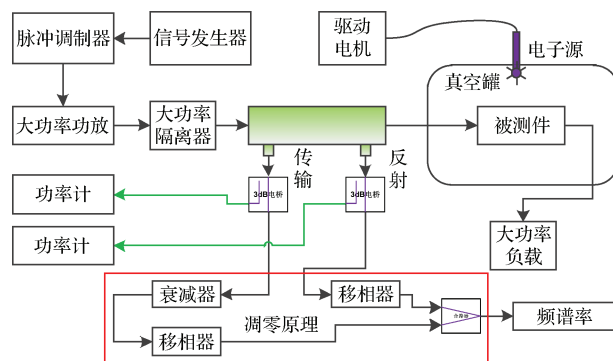


图2 前向/后向功率检测法及调零检测法原理

如图2所示,真空罐模拟航天器轨道空间,为实验件提供低于 1×10^{-3} Pa的高真空环境;电子源产生实验测试所需的一次原电子,激发微放电效应;信号发生器、脉冲调制器及功放输出大功率连续波及顶底功率可调的脉冲激励信号,使试验件处于正常工作状态,通常为了防止微放电发生,微波部件的设计需预留3 dB、6 dB或10 dB的窄脉冲功率余量,以避免一些不可预知的因素降低阈值电平,从而导致放电的发生,因此在测试时也需为试验件提供一种不归零的大功率脉冲激励信号,以验证在这些功率状态下微放电防护设计是否达标^[7];隔离器、耦合器是大功率传输链路中的重要组成部分,隔离器起到大反射保护作用,防止微放电发生时反射功率突变损坏功放系统,双向耦合器实现大功率传输及反射信号的定比例提取;功率计、频谱仪、3 dB电桥、衰减器及移相器等是实现微放电测试的重要组成部分,传输及反射信号经耦合器提取后,通过3 dB电桥各分为两部分:1)输入至功率计,用于监测传输及反射信号的平均功率及峰值功率;2)通过衰减器、移相器进行幅度、相位调节,将两路信号调成接近等幅反相,再经同相合路输出,用频谱仪监测调零信号幅度是否有异常跳变。采用前向/后向功率及调零检测时发生微放电的现象主要有3种:1)反射功率不变或微变,调零信号幅度发生瞬变,但随即恢复;2)反射功率不变或微变,调零信号幅度发生较大跳变;3)反射功率和调零信号幅度都发生较大跳变。3种现象代表着放电层次逐渐增强,反射信号幅度和相位的变化亦越加明显。

2 系统总体设计

微放电效应检测同步监测参数较多、实验测试时间较长、对热真空环模系统、功放、测试仪器等设备配置较为复杂,各项监测数据也需要实时进行二次加工处理,以较为直观的方式显示给测试人员。传统的人工测试方法既费时又费力,已经不能适应实际测试的需求,而且测量的结果还会受到人为因素的影响。随着各设备接口总线的发展,解决了自动测试系统中仪器、设备间的接口问题^[8]。为了满足某星载大功率微波组件的研制及生产需求,设计一套全自动、高效率、高灵敏度的微放电效应检测系统。微放电检测是一项系统性工程,涉及应用领域较多,组成较为复杂。

如图3所示,为了便于系统研制工作的同步开展,将系统总体分为主控子系统、专用测试子系统、功放子系统、大功率传输链路及热真空环模子系统等5大部分:主控子系统通过网络与系统其他各功能进行通信,对各功能单元进行控制并回读相应测量数据,主控软件对读取的数据进行处理,以图形、曲线、数值、告警等方式将测试结果显示给操作人员,同时记录整个实验测试过程中的各项操作并存储测试数据,若对测试环节或结果存疑,可通过回放功能重新对试验测试过程及结果进行研判,是整个系统的核心控制单元;专用测试子系统主要针对以下6个功能开展设计:1)为功放子系统提供小功率射频激励信号;2)向试验件发送遥控指令,接收试验件反馈的遥控信息;3)对各类射频信号功率进行监测;4)接收传输链路正反向耦合输出射频信号,进行调零处理并监测调零频谱;5)对试验件及整系统传输链路S参数进行检测;6)实现整系统及试验测试过程中异常现象的故障报警。专用测试子系统通过选用合适的标准测试仪器信号发生器、频谱仪、矢量网络分析仪及功率分析仪,研制专用测试装置脉冲调制器、遥控指令发生器、调零装置、报警装置等整合、集成而实现^[9];功放子系统是决定微放电测试频率范围、功率容量、可信度及系统可靠性的关键设备,为了满足现阶段测试需求,功放频率范围定为1~4 GHz、功率容量1 000 W,分为L、S两个波段,采用固态功放模块逐级合路实现,使用时需根据测试频点选择相应频段的功放子系统,对于宽带功放,输出谐波波的抑制也是必须考虑的因素;如图4所示,大功率传输链路主要实现大功率信号的传输、反射信号的隔离、所需监测信号的定比例提取、信号的匹配吸收等功能。反射信号的隔离是保证系统安全、可靠所必须采取的措施,微放电的发生会导致反射功率瞬间增大,甚至发生全反射,若无保护措施,会对功放子系统造成损伤,甚至烧毁,在设计时采用环形器加负载的方式实现,有利于保证反向隔离性能^[10]。传输、反射及实验件输出信号的监测主要通过大功率双定向耦合器实现,对耦合器直通插损、端口驻波、方向性、耦合度的稳定性都有较高要求,同时为了保证耦合输出信号能够在功率计探头最佳测量动态范围内(一般为-20~+20 dBm),需合理规定耦合器耦合

度指标(比如要实现0.1~1 000 W功率的监测,耦合器耦合度指标标称值需定为40 dB)。信号的匹配吸收主要依靠大功率负载实现,其端口驻波及功率容量是关键指标。此外常规大功率电缆组件或波导、真空罐壁气密性穿墙法兰、真空室内需具有微放电防护性能的电缆组件或波导等也是系统的重要组成部分,在此因篇幅受限,不再详细叙述;热真空环模系统在试验测试过程中为试验件提供高低温及真空环境条件,罐体部分主要分为透波真空罐体和金属罐体,主要根据自身测试需求选择合适的材料,目前国内至少具有4~5家科研机构或公司从事此设备的研制工作,作为应用者,主要需考虑的是系统可靠性、操作便利性和后期使用成本及维护成本,现阶段系统中真空罐体选用金属罐体,内部有效尺寸为 $\varnothing 1\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ (直段),温度范围-120~+150℃、极限真空度 $1 \times 10^{-4}\text{ Pa}$,可满足大部分非天线类微波部件的测试需求;目前自由电子的产生,选用低活度Sr90放射源提供。放射源是指利用放射性核素研制并能产生辐射的制品,其放射性泄漏会给人体带来极其严重危害,监管缺位容易造成放射性事故甚至引发核辐射灾难,因此在使用过程中必须严格监控,操作人员也须采取相应的个人防护措施^[11]。Sr90放射源通过负(粒子即负电子衰变产生自由电子,其释放电子能量为546 keV,可穿透大部分微波部件表面,进入腔体内部,在大功率射频场的作用下,撞击腔体表面,激发二次电子倍增^[12]。

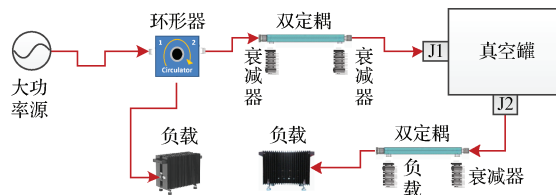
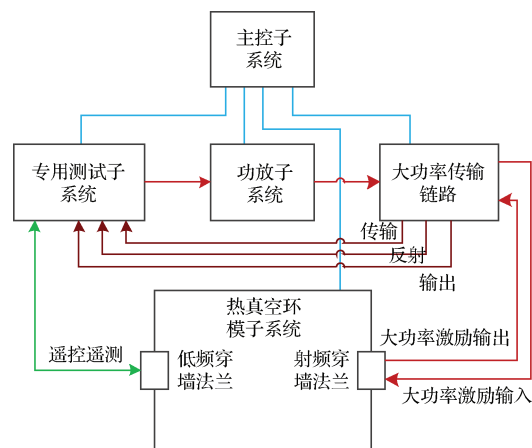


图4 大功率传输链路示意图

3 调零装置的设计

如上所述调零装置的主要功能是对传输、反射耦合输出信号的幅度、相位进行调节并同相合路输出,在主控子

系统及频谱仪的辅助下实现自动调零,即将两路信号调成等幅反相^[13]。在现有频谱仪动态范围能够保障的情况下,实现大深度调零可大大提高微放电测试的灵敏度,调零信号幅度越小对微放电发生时引起的反射信号幅相变化反馈越敏感。

若传输信号为: $S_F = U_A \sin(\omega t + \theta_1)$;

反射信号为: $S_R = U_B \sin(\omega t + \theta_2)$;

两路等幅信号同相合路后:

$$S = U_A \sin(\omega t + \theta_1) + U_B \sin(\omega t + \theta_2) = U_A [\sin(\omega t + \theta_1) + \sin(\omega t + \theta_2)] = 2U_A \sin\left(\frac{2\omega t + \theta_1 + \theta_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right);$$

若两路信号相差 180° , 即 $\theta_1 - \theta_2 = 180^\circ$, 则 $S = 0$, 两信号相抵消。但理论上的等幅反相在实际工程中受低频噪声、射频信号干扰、器件线性度、控制信号精密度等因素影响不可能实现,同时受测试设备的限制,只能根据实际情况尽可能调成接近等幅反相。

如图5所示,信号进入幅度、相位调节通道后,先通过频谱仪读取两路信号幅度差值,再经调节衰减器,将两路信号幅度调成一致,在此衰减器衰减量的变化会引起相位大幅变化,因后部要进行相位调节,因此不刻意追求衰减器的稳相指标。两路信号幅度一致后,主控软件采用二分法,在频谱仪的辅助下调节移相器,将信号幅度调至最小。调零信号幅度的大小取决于衰减电路、移相电路的调节最小步进量,步进量越小,两路信号越可接近等幅反相。本系统中调零装置可实现 60 dB 、 0.01 dB 步进量的幅度调节,移相参数 360° 、最小移相量 0.1° ,调零信号幅度最小可达 -110 dBm ,可有效实现弱放电的检测。

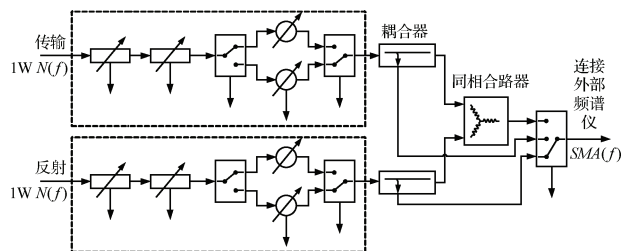


图5 调零装置原理

4 试验验证

为了验证测试系统的有效性,中国电科41所联合航天科技集团相关单位及本集团卫星微波载荷设备研制单位以微波同轴开关为验证件开展了数次试验测试,下面将对试验过程及试验结果进行阐述。

用于系统验证的微波同轴开关主要用于北斗导航系统工程某星中的信号通道切换,其额定功率容量为 150 W 连续波,预留 6 dB 脉冲余量,测试频点在 $1 \sim 2 \text{ GHz}$ 范围内,首先在 150 W (51.8 dBm) 额定连续波功率条件下保持 30 min ,在此时间段内未发生放电再加载占空比 1% 的窄脉冲信号,峰值功率 600 W (57.8 dBm)。

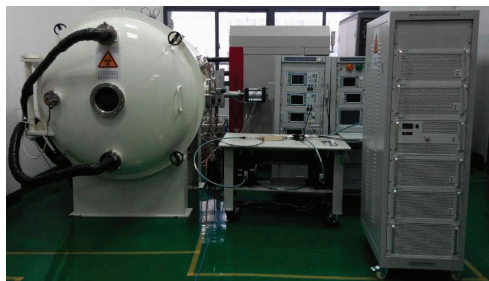


图6 微放电效应检测系统

试验起始首先连接大功率传输链路,测试传输链路相应各段的插损,以用于功率测量补偿,同时测量整个传输链路的各项 S 参数,验证链路的连接性能,以保证大功率信号的正常传输。之后根据微波同轴开关测试条件,将实验件在真空罐内固定连接好后,在试验件表面及真空罐内适当位置放置温度探头,将电子源放置在试验件附件,一切就绪后关闭罐体舱门,启动热真空环境系统,开始抽真空并保持,温度依据试验件测试要求执行变温操作^[14]。在罐体内气压、温度保持足够时间后,设置大功率激励源为连续波模式,试验件起始输入功率 40 dBm ,输出功率 1 dB 步增,当实验件输入功率达到 48 dBm 时,功率改为 0.5 dB 步增,达到 51 dBm 时,改为 0.1 dB ,在每个功率阶段保持 10 min ,设置自动调零,保持调零状态,以观察微放电现象是否出现,观察到微放电现象后,要将功率减小,以重新核对其阈值,在达到额定功率时,保持 30 min ,时刻观察反射功率、调零信号是否存在异常跳变^[15]。实验验证连续波模式下未发生微放电,之后将大功率激励源设置为脉冲模式,按照上述步骤,重新设置实验件输入功率值,直至平均功率达 150 W 、脉冲峰值功率 600 W ,在保持 3 min 后,调零电平从 -80 dBm 跳变至 -20 dBm 、反射功率从 2.3 W 跳变至 40 W ,反射功率及调零信号幅度均发生较大跳变,此时关闭大功率激励源,使真空罐恢复常温、常压,将试验件拿出测试其常规性能指标,其端口驻波及插损指标已有较大程度恶化,打开腔体,其内部有明显的灼烧痕迹,实验测试结果表明,实验件已发生明显的微放电现象。

5 结论

经试验验证表明,系统能够达到预期效果,能够满足单载波、无源微波部件的微放电测试需求,目前已应用于宇航级大功率微波同轴开关、电缆组件及射频连接器的微放电效应测试。随着航天、航空技术的快速发展,对微波载荷设备的要求也将逐步提高,现阶段对微放电测试技术的研究,将为后续更高频段、多载波模式、有源部件的微放电及低气压放电测试提供良好的借鉴和参考。

参考文献

- [1] 彭喜元, 庞景月, 彭宇, 等. 航天器遥测数据异常检测综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 1929-1945.

- [2] 黄光孙, 田普科, 关跃强, 等. 微波部件抑制微放电效应表面处理工艺研究—铬酸盐转化膜工艺研究[J]. 空间电子技术, 2014(1):97-101.
- [3] 李砚平, 马伊民. 一种多载波情况下的微放电检测新方法[J]. 空间电子技术, 2009, 6(3):103-107.
- [4] 魏焕, 马伊民. 一种对大功率器件微放电检测新方法的研究[J]. 空间电子技术, 2014(4):7-10.
- [5] 武小坡, 赵海洋. 微波大功率组件微放电研究[J]. 微波学报, 2012, 28(6):62-65.
- [6] 宋庆庆. 多载波微放电过程的概率分析[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [7] 柳荣. 空间微波器件微放电特性分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2009.
- [8] 肖圣兵. 某型雷达通用自动测试系统的设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4):96-100.
- [9] 邵帅, 王成华. 无源器件多载波功率容限测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12):110-113.
- [10] 杨林颖. 铁氧体非互易器件新结构及其特性研究[D]. 成都:电子科技大学, 2011.
- [11] 李远茂, 刘桂雄, 曾成刚. 基于GPS的室外放射源信息监控系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1244-1254.
- [12] 张娜, 崔万照, 胡天存, 等. 微放电效应研究进展[J]. 空间电子技术, 2011, 8(1):38-43.
- [13] 魏焕, 马伊民. 微放电检测方法分析[J]. 现代电子技术, 2014(7):143-146.
- [14] 武小坡, 赵海洋, 奚松涛. 星载高功率固态功放关键技术及实验研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(3):288-294.
- [15] 刘中华, 李树杰. 星用微波组件低气压放电与真空微放电效应研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32(4):4-7.

作者简介

雷卫平, 1985 年出生, 助理工程师, 主要研究方向为大功率微波部件及固态功放系统测试、预警及电子对抗等雷达整机、分机及模块的综合测试。

E-mail:eiqd@ei41.com

郭荣斌, 1971 年出生, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为微波电子测量仪器、天线及雷达综合测试系统。

E-mail:eiqd@ei41.com