

一种抑制微放电的宽带大功率定向耦合器设计

秦 楚¹, 张 恒¹, 屈文星², 崔万照¹

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000; 2. 西安卫星测控中心, 西安, 710100)

摘 要:在卫星有效载荷系统中, 3 dB 定向耦合器作为微波工程关键器件已得到广泛应用, 而此类器件在太空真空环境中, 常因真空环境下大功率工况引发的微放电效应形成谐振放电现象, 影响耦合器性能与寿命, 对于卫星系统日益增多的小型化及大功率需求, 在器件设计时应充分考虑微放电效应并兼顾小型化要求, 采用有效抑制手段以确保器件在轨稳定可靠。通过分析定向耦合器工作原理与不同结构耦合器之间的差异, 阐述了真空环境下的微放电效应产生机理, 针对性地采取基于奇偶模分析法的耦合线结构耦合器设计方法, 选用高导热材料 Rogers TC350 + 作为耦合器介质, 利用软基板多层混压方式进行产品加工, 通过仿真试验与真空环境实测, 表明此类设计既具有体积小、重量轻的特点, 又可有效抑制器件微放电效应, 确保了耦合器的工作性能, 满足卫星系统使用工况。

关键词:定向耦合器; 3 dB 合成电桥; 微放电效应; 耦合线结构; 宽带大功率

中图分类号: V443; TN622

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2022)04-0120-05

Design of a broadband high power directional coupler for suppression of multipactor

QIN Chu¹, ZHANG Heng¹, QU Wenxing², CUI Wanzhao¹

(1. China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China;

2. China Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710100, China)

Abstract: In the satellite payload system, 3 dB directional coupler has been widely used as a key device in microwave engineering. In the spatial vacuum environment, resonant discharge is often caused by micro discharge effect which due to high-power working conditions, which would affect the performance and service life of the directional coupler. In the device design, the micro discharge effect should be fully considered and effective suppression measures should be adopted to ensure the stability and reliability of the device on orbit. By analyzing the working principle of directional coupler and the differences between couplers with different structures, and the mechanism of micro discharge effect in vacuum environment is described, the design method of coupling line structure coupler which based on parity model analysis is adopted, and the high thermal conductivity material which called Rogers TC350 + is selected as the coupler medium. The product is processed by multi-layer mixing of soft substrates. Through simulation test and measurement in the vacuum environment, the results show that this kind of design method for broadband high-power directional coupler can effectively suppress the multipactor effect, which the working performance of the coupler is ensured.

Key words: directional coupler; 3 dB synthetic bridge; multipactor effect; coupling structure; broadband high power

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-06-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(编号: 61901360)

引用格式: 秦楚, 张恒, 屈文星, 等. 一种抑制微放电的宽带大功率定向耦合器设计[J]. 空间电子技术, 2022, 19(4): 120-124.

QIN C, ZHANG H, QU W X, et al. Design of a broadband high power directional coupler for suppression of multipactor[J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(4): 120-124.

0 引言

在卫星有效载荷系统中,3 dB 定向耦合器常用于微波信号的合成分路处理,随着航天技术的不断发展,对定向耦合器的带宽与功率容量需求随之提升,宽带大功率定向耦合器的设计已成为微波领域重点研究的课题。在真空环境中,大功率器件容易引发微放电效应^[1],影响器件性能与寿命。因此,在器件设计时应充分考虑微放电效应,采用有效抑制手段,确保器件在轨稳定可靠。

在微波工程应用中 3 dB 定向耦合器常用类型有平面耦合器、波导耦合器与耦合线耦合器 3 类。平面定向耦合器为满足宽带需求,常采用多级级联设计,但该设计 Q 值低、损耗大,且功率容量受隔离电阻制约,多用于小功率应用场合^[2];波导定向耦合器功率容量较高,但带宽较窄且体积较大,星载成本较高^[3];耦合线定向耦合器工作带宽较宽,通过使用合适的介质层材料代替空气层,可有效提高功率容量,选用高导热介质材料,可解决真空环境中放电部位过热至损的问题^[4]。

本文结合 L 频段某型卫星载荷应用需求,针对大功率宽带 3 dB 定向耦合器在真空环境中产生的微放电效应进行分析,提出采取耦合线定向耦合器设计方法,选用高导热材料代替空气层作为耦合器介质,以满足工程应用需求。

1 耦合线定向耦合器工作原理

耦合线定向耦合器(合成电桥)为 4 端口器件,分为输入端口、直通端口、耦合端口和隔离端口,信号从输入端进入,按一定比例被分配到直通端口和耦合端口输出,理想情况下隔离端无信号输出^[5]。其中,3 dB 定向耦合器输出端口与耦合端口输出功率等分,输出信号相位相差 90° ,其耦合区长度或称耦合节长度为工作中心频率的 $1/4$ 波长,耦合器结构如图 1 所示。

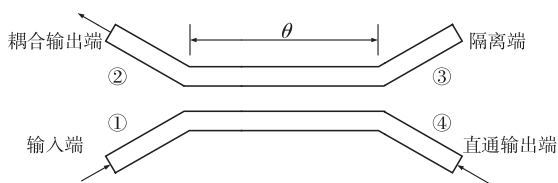


图 1 耦合线定向耦合器

Fig. 1 Coupling structure directional coupler

定向耦合器常采用耦合度 C , 方向性 D , 隔离度 I 来表征,对于单节耦合线耦合器,常用奇偶模分析

法进行设计^[6]。

将耦合器各端口阻抗分解为奇模阻抗 Z_{0e} 与偶模阻抗 Z_{0o} ,当耦合器端口阻抗 Z_0 满足 $Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$ 时,耦合器处于完全匹配状态,对于单节耦合线耦合器^[7],其 S 参数为:

$$S_{11} = S_{31} = 0 \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{jk_0 \tan \theta}{\sqrt{1 - k_0^2} + j \tan \theta} \quad (2)$$

$$S_{41} = \frac{\sqrt{1 - k_0^2}}{\sqrt{1 - k_0^2} \cos \theta + j \tan \theta} \quad (3)$$

其中, $k_0 = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}$,为中心频率上耦合电压系数, θ 为电长度。

k_0 与耦合度 C (dB 形式) 的关系为:

$$C = 10 \log \frac{1}{k_0^2} \quad (4)$$

根据上述公式可知,其耦合口与直通端相位相差为 90° ,其耦合度与电长度有关,在中心频率处耦合最强,偏离中心频率耦合度随之递减,在 $\theta = \pi/2$ 时,耦合端有其第一个最大值,若特征阻抗与电压耦合系数 k_0 已知,则可得:

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + k_0}{1 - k_0}} \quad (5)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1 - k_0}{1 + k_0}} \quad (6)$$

2 微放电效应

在真空环境中,发生在两个金属或介质材料之间或是单个金属或介质材料表面的谐振放电现象,称为微放电效应^[8]。微放电效应又称为电子二次倍增效应,在微波器件中游离的自由电子在电磁场的驱使下,在器件内不断往返运动并加速轰击器件表面,同时产生大量二次电子,直至形成谐振放电现象^[9]。

微放电效应与射频频率 f 和间距尺寸 d 有关,射频频率是固有的,在设计时,为了增大电子渡越时间,应尽可能增大导体之间的间隔尺寸,使电子的渡越时间长于电压周期的一半,从而增大器件的功率容量^[10]。

随着导体之间距离的增加,器件的体积和重量也会增加。在卫星系统中,重量和体积与成本密不

可分,通过增加导体之间距离的方法并不可取。因此,在导体之间填充介质,扩大等效间隔是一种经济而高效的方法^[11]。填充介质缩短了电子的平均自由程,使电子渡越时间大于射频电压周期的一半,提高了微放电效应功率阈值与器件功率容量。

介质中二次电子的发射金属材料放电产生的热量更多,而大部分介质导热率不高,造成放电部位热量堆积,导致器件局部热量过高而发生损坏^[12]。因此,介质基板的选择十分重要。

综上,在某型号定向耦合器设计中,针对真空功率容量需求,采用高导热介质材料代替空气层,达到扩大等效间隔效果;针对介质材料导热率不高问题,在建模仿真与加工时,选用高导热材料 Rogers TC350 + (介电常数 3.55,导热率 1.23 W),利用软基板多层混压方式进行产品设计与加工。同时,设计时对基板宽度进行加宽处理,进一步扩大散热面积,有效提升介质导热效率。

3 定向耦合器仿真设计

定向耦合器设计指标如下:工作频段:1 ~ 1.5 GHz,反射系数 ≤ -20 dB,隔离度 ≤ -20 dB,耦合度 3 dB,带内损耗 0.5 dB,真空微放电功率连续波 300 W。

耦合器采用三层结构介质基板,利用软基板多层混压方式^[13],采用两层金属带线混压,仿真时设置介电常数为 3.55。根据奇偶模分析法,耦合电压系数 $k_0 = 10 - 3/20 = 0.708$,特征阻抗 $Z_0 = 50 \Omega$,则可得奇偶模阻抗理论值 $Z_{0e} = 120.92 \Omega$, $Z_{0o} = 20.67 \Omega$ 。

在 HFSS 软件中进行耦合器设计仿真,按照常用微波组件综合方法进行参数计算^[14],通过调整带线宽度与耦合间距,使仿真结果与理论值相同。仿真结果如图 2 所示。

in_x [um]	Z00 Setup1: LastAdaptive Freq=1.25GHz	ZEO Setup1: LastAdaptive Freq=1.25GHz	ZZO Setup1: LastAdaptive Freq=1.2GHz
510.000000	20.661221	120.711673	50.300746

图 2 耦合器仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the directional coupler

以计算得到的带线宽度与耦合间距为初始尺寸,建立端口模型,优化端口、过渡段、接地孔尺寸等参数,直到仿真指标满足性能要求。定向耦合器仿真指标如表 1 所示,耦合器仿真模型如图 3 所示,仿真曲线如图 4 所示。

表 1 定向耦合器仿真指标

Tab. 1 Simulation index of the directional coupler

仿真项目	指标要求	仿真值
工作频段/GHz	1 ~ 1.5	1 ~ 1.5
反射系数/dB	≤ -20	-28
隔离度/dB	≤ -20	-29
损耗/dB	≤ -0.5	-0.2

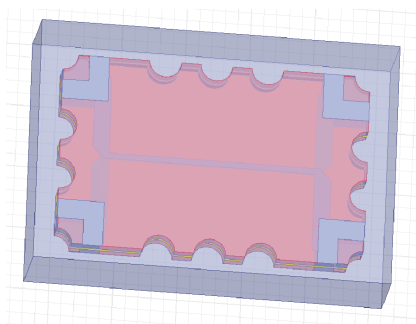


图 3 耦合器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of the directional coupler

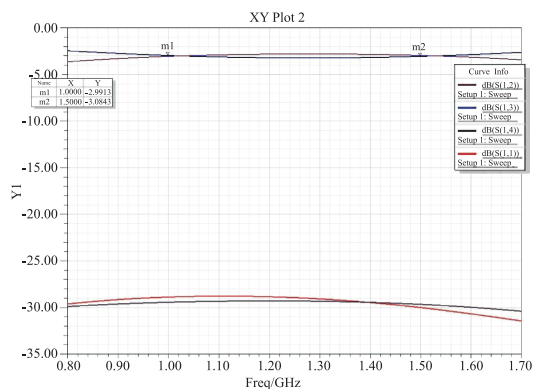


图 4 耦合器仿真曲线

Fig. 4 Simulation curve of the directional coupler

4 实测验证

根据仿真模型参数进行定向耦合器加工设计,耦合器加工实物图如图 5 所示。

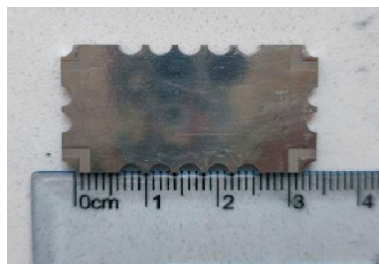


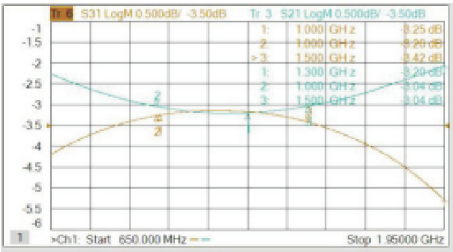
图 5 定向耦合器实物图

Fig. 5 Physical object of the directional coupler

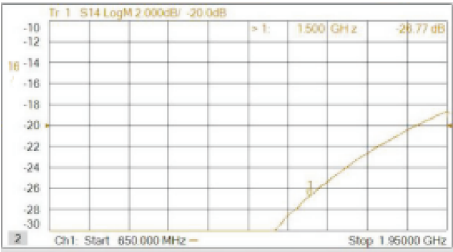
将定向耦合器接入矢量网络分析仪,对实物进行测量,实测结果如表 2 所列,实测曲线如图 6 所示。

表 2 定向耦合器实测结果
Tab.2 Measurement results of the directional coupler

实测项目	指标要求	实测值
工作频段/GHz	1 ~ 1.5	1 ~ 1.5
反射系数/dB	≤ -20	-23
隔离度/dB	≤ -20	-26
损耗/dB	≤ -0.5	≤ -0.42



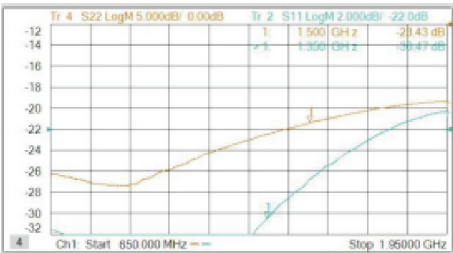
(a) 耦合器传输特性



(b) 耦合器隔离度



(c) 耦合器端口驻波-1



(d) 耦合器端口驻波-2

图 6 耦合器实测曲线
Fig.6 Measured curve of the directional coupler
按照微放电试验标准搭建测试平台^[15],将合成

桥接入真空罐,真空度小于 1.5×10^{-4} Pa,分别在中心频率 1.25 GHz 与上边频 1.5 GHz 处进行微放电试验,实验条件如表 3 所列。

表 3 耦合器测试环境参数
Tab.3 Test environment parameters of the directional coupler

测试频点/GHz	真空度/Pa	入射功率/W	最高温度/℃
中心频率 1.25	1.5×10^{-4}	连续波 300 脉冲 1 100,2 200	82.9
上边频 1.5	$\sim 8.8 \times 10^{-5}$	连续波 300 脉冲 1 100	85.3

微放电试验实测场景图如图 7 所示。

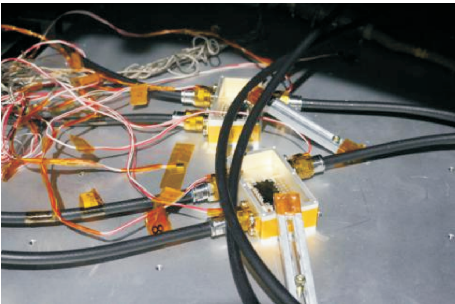


图 7 微放电试验实测场景图
Fig.7 Testing scene of the micro-discharge test
实测结果表明耦合器在入射功率连续波为 300 W,脉冲为 1100 W 时无异常现象,定向耦合器复测性能良好。

5 结论

在卫星载荷真空应用环境中,大功率宽带定向耦合器会出现微放电效应,本文采用耦合线结构定向耦合器进行设计,耦合器中间层介质中使用了高导热材料 Rogers TC350 +。在真空度优于 1.5×10^{-4} Pa 的环境下对耦合器进行大功率实测,测试过程中器件温度低于 85.3 ℃,复测性能良好,结果表明器件在满足耦合度、隔离度、损耗等指标的同时,可有效抑制真空环境中微放电效应,确保了耦合器的工作性能。

参考文献:

[1] 崔万照,李韵,张洪太,等. 航天器微波部件微放电分析及其应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2019.
[2] TANG C W,CHEN M G,LIN Y S,et al. Broadband mi-

- crostrip branch – line coupler with defected ground structure[J]. Electronics Letters, 2006, 42(25): 1458-1460.
- [3] 石德万, 王文祥, 魏彦玉, 等. 波导带状线同轴线型定向耦合器特性[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(1): 119-122.
- [4] 覃基伟, 陈晓光. 定向耦合器的高功率小型化设计[J]. 信息与电子工程, 2012, 10(1): 56-59.
- [5] 徐锐敏, 唐璞, 薛正辉, 等. 微波技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 80-82.
- [6] POZAR D M. Microwave Engineering [M]. 3rd ed. Wiley, 2006, 293-297.
- [7] 赖宏南. 一种宽带微带线耦合器的设计[J]. 电子质量, 2014(4): 29-32 + 36.
- [8] 魏焕, 王新波, 胡天存, 等. 航天器大功率微波部件微放电测试研究进展[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 41-46.
- [9] VAUGHAN J R M. Multipactor[J]. IEEE Transaction. on Electron Devices, 1988, 35(7): 1172-1180.
- [10] 宋强强, 崔万照, 杨晶, 等. 中国空间大功率微波部件微放电抑制表面处理技术最新进展[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(3): 43-54.
- [11] 曹桂明, 聂莹, 王积勤. 微波部件微放电特性分析[J]. 航空计算技术, 2006, 36(2): 6-8 + 12.
- [12] 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.
- [13] 王娇. 基于谐振环法的微波基材参数的测量技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [14] 秦楚, 殷新社. 分歧波导多工器综合方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8): 76-81.
- [15] 陈潇杰, 刘臻龙, 刘长军. 用于微放电测试的 S 波段注入锁频磁控管试验研究[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(2): 96-102.

作者简介: 秦楚(1990-), 陕西西安人, 硕士, 工程师。主要研究方向为空间微波技术。E-mail: 1214175286@qq.com

通讯作者: 崔万照(1975-), 山东高密人, 博士, 研究员。中国空间技术研究院首席研究员、航天科技集团公司卫星通信方向学术技术带头人、陕西省高层次人才特殊支持计划专家、入选国防高层次人才、国务院政府特殊津贴获得者、南京航空航天大学兼职博导、西安交通大学、天津大学、四川大学、浙江大学兼职教授, 发表学术论文 200 余篇, 出版专著/译著多部。主要研究方向为空间微波技术。E-mail: cuiwanzhao@126.com