DOI: 10.11991/yykj.202001019

C 波段波导同轴转换器设计及其微放电功率阈值

李继超',陈潇杰',刘长军',白鹤2,崔万照2

1. 四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064
2. 中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室,陕西 西安 710100

摘 要:针对空间应用中微放电效应对微波器件的制约,设计了一种 C 波段高微放电功率容量的波导同轴转换器。基于从 局部到整体的微放电敏感区域分析方法,对同轴接头和馈电体进行优化,提出了改进型后馈式波导同轴转换器。频率在 3.0~ 5.4 GHz 时,回波损耗大于 15 dB,插入损耗低于 0.3 dB。实验测试得到微放电功率阈值突破 7 kW,与理论分析结果吻合。 该波导同轴转换器结构简洁,微放电功率阈值高,有望在空间得到应用。微放电分析的方法对空间微波器件抑制微放电的 设计有借鉴意义。

关键词:C 波段; 波同转换器; 阻抗变换; 微放电; 敏感区域; 二次电子发射率; 阈值; 抑制 中图分类号: O441.4 文献标志码: A 文章编号: 1009-671X(2020)06-0005-05

Design of a C-band waveguide coaxial converter and study on its multipactor power threshold

LI Jichao¹, CHEN Xiaojie¹, LIU Changjun¹, BAI He², CUI Wanzhao²

 School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 61004, China
National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China

Abstract: Aiming at restriction of micro-discharge effect on microwave devices in the space applications, we designed a waveguide coaxial converter with high micro-discharge power capacity in C band. In this paper, based on an analysis of the sensitive area of multipactor from local area to the whole region, an improved end-launch waveguide coaxial with high multipactor power threshold is presented based on the optimized coaxial joints and feeders. Its return loss is more than 15 dB and and insertion loss less than 0.3 dB between 3.0 GHz to 5.4 GHz, respectively. The multipactor power threshold breaks through 7 kW in experiments, which agrees to theoretical analysis. The proposed waveguide coaxial converter has a concise structure with high multipactor power threshold, which is prospective in future application in space. The analysis method may aid the design of microwave components in suppression of multipactor effects.

Keywords: C-band; waveguide coaxial converter; impedance transformation; multipactor; sensitive areas; secondary electron yield; threshold; suppression method

微放电是微波器件在空间应用时出现的一种 二次电子谐振倍增现象^[1-2]。在空间应用中,会造 成信号恶化和系统噪声增加,反射系数增加并引 起功率损耗,严重时破坏器件表面^[3-10]。通过对微 放电产生机理的研究,逐渐提出了一些抑制微放 电的方法,如提高工艺、避免表面凸起等^[6]。设计

基金项目:国家自然科学基金项目(62071316). 作者简介:李继超,男,硕士研究生; 刘长军,男,教授,博士生导师. 通信作者:刘长军,E-mail: cjliu@scu.edu.cn. 中应尽量增加间距,减小电场强度。另一种有效的办法是在敏感区域选择低二次电子发射率(secondary electron yield, SEY)特性的材料^[5-7],或使用低 SEY 材料对器件表面处理,例如 TiN 薄膜。文献 [8]中通过磁控溅射沉积涂层技术制备了不同钛氮原子比和不同厚度的 TiN薄膜,降低材料 SEY。因此,可通过分析微波器件内微放电敏感区域,优化器件结构或者材料处理来提高微放电阈值。

波导同轴转换是微波系统的一个重要转接器,底馈结构通常比侧馈结构功率容量更高。本 文针对空间微波系统提高微放电功率容量的迫切

收稿日期:2020-01-29.

需求,设计了一款改进型后馈式C波段的波同转换器。基于微放电敏感区域分析,改进了同轴内导体与波导过渡的方式,提高了其微放电功率容量。实验测量微放电阈值突破7kW。

1 微放电现象和分析方法

微放电现象本质为电子在微波场中的谐振运动,二次电子在电场的加速下撞击到材料表面, 产生多个二次电子再次被电场加速,出现倍增过 程^[1,11-12]。文献[11]用平板模型描述该现象,并探 索抑制微放电的关键因素,如图1所示,平板间距 为*d*。



图1 平板模型微放电过程

设微波电场为

 $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{e}_{x} E_{0} \sin(2\pi f t + \varphi)$

式中:f 为频率; φ 为相角; e_x为 x 方向的单位矢量。 设电子的质量为 m, 电荷为 e, 则电子运动方

程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = e|\mathbf{E}| \tag{1}$$

$$m\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = 0 \tag{2}$$

通过积分将两平板间的击穿电压表示为

$$V = \frac{(2\pi f d)^2 m/e}{(2n-1)\pi \cos \varphi \frac{k+1}{k-1} + 2\sin \varphi}$$
(3)

式中:n为半周期个数;k为金属表面比例系数,与 二次电子发射系数δ有关^[13]。

从式 (1)~(3) 可以看出, 当工作频率确定后, 影响微放电阈值的主要因素是器件结构和材料属 性。间距越大, 材料 SEY 越低, 则微放电阈值越 高。在微波器件设计中, 器件结构复杂, 很难进 行整体结构的微放电分析。从结构表面间距着 手, 用全波电磁仿真比较不同表面间距处的峰值 电场强度, 确定表面间距小且电场强度大的区域 为敏感区域, 对该区域分析微放电现象, 进行结 构改进或者材料处理, 提高器件的微放电功率阈 值并保持良好的传输性能。

2 波同转换器设计

工程上常用的波同转换器有后馈式与侧馈

式^[13]。侧馈式为探针结构,后馈式为过渡结构,后 馈式功率容量通常较高。本文进行后馈式波同转 换设计,考虑到空间应用器件重量的限制,材料 采用铝。文献[14]给出了后馈式波导同轴转换器 中的阶梯阻抗变换的三端口等效电路模型,如图 2 所示。



图2 阶梯结构等效电路模型

图中 X₁、X₂、X_{TE} 分别为输入、输出、TE₁₁ 端口 的等效电抗, B 为阶梯结构引入的电纳, N 为阻抗 变换系数。

本文基于 BJ40 波导采用三级阶梯做阻抗变 换,波导的宽边和窄边分别为 58.2 和 29.1 mm, 结构示意图如图 3 所示。通过电磁场全波仿真分 析,以功率容量和带宽为目标进行结构设计。发 现图 3 中区域 1、2 和 3 间距小、电场强度高,为微 放电敏感区域。



图3 波同转换器剖面

1) 针对区域 1, 选用 50 Ω 的 L29 同轴接头, 增加内外导体间距。内外导体半径 R_{in} 和 R_{out} 分别为 3.5 和 8.0 mm。

2)针对区域2和3,提出将同轴内导体与阶梯 块的连接结构换成矩形块,实现良好阻抗匹配, 并提高功率容量。 通过仿真计算进行结构优化,确定阶梯的宽 度为 12.0 mm, L_1 =17.0 mm, H_1 =5.0 mm, L_2 =14.0 mm, H_2 =7.0 mm, L_3 =7.0 mm, H_3 =9.0 mm。阶梯距离波导 底部 L_i =4.5 mm, 整体位于宽边中心。同轴圆心距 波导窄边的距离为 D_1 =29.1 mm, 距波导宽边的距 离 D_2 =14.55 mm, 过渡段横截面为正方形, 边长 W_i = 7.5 mm。

中心频率为4GHz波同转换器仿真性能对比如图4所示。传统结构在频率为2.8~5.0GHz时,回波损耗均大于15dB,相对带宽达到55%,插入损耗小于0.1dB。将过渡段横截面换成本文提出的矩形结构后,得到回波损耗高于15dB的阻抗带宽可达到77.5%,在频率为3~5.4GHz时,回波损耗均大于20dB。敏感区域中结构间距也得到了增加。



3 波同转换器微放电分析

本文采用全波仿真软件和欧空局微放电仿 真软件 Multipactor Calculator(MC)进行微放电阈 值分析。由仿真物理模型可知,按从小到大的原 则标注出该波同转换器表面间距较小的 3 块区 域如图 3 所示,分别在此 3 处内导体表面设置电 场探针,比较特定输入功率时的峰值电场强度。 仿真结果如表 1 所示,位置 1 处 (L29 同轴)表面 间距最小且电场场强最高,是微放电发生最敏感 区域;位置 3 处的表面间距与 L29 同轴处相同, 但由于处于短路面处,有效场强最小不易发生微 放电。

表1 有效功率为1W时电场分布

序号	场强/(V·cm ⁻¹)	表面间距/mm
1	31.90	4.5
2	30.71	8.1
3	6.28	4.5

在仿真设置中,金属铝的二次电子发射模型为 Vaughan 模型,其 δ_{max} 设置为 2.41,且对应的能量 E_{max} =310 eV。微波为 4.0 GHz 正弦信号,网格剖分精度为每波长至少离散 20 网格。微放电分析的重点在 L29 部分,结果通过粒子数与时间的关系呈现。

欧空局微放电仿真软件 MC 能够快速分析典 型微波部件如波导、同轴结构以及平板缝隙的微 放电敏感曲线和微放电阈值功率或者电压,支持 金、银、铝等 5 种表面材料分析。在该软件中设 置自定义同轴 L29, 计算其微放电敏感曲线和微 放电功率阈值。如图 5 所示, MC 预测波同转换 器的微放电阈值为 5 184 W。



图5 L29 同轴微放电敏感曲线

采用全波仿真软件模型,计算不同微波功率 下粒子数与时间关系曲线,如图 6 所示。当输入 功率超过 8 400 W, 100 ns 后粒子数已呈现增长趋 势,预测该波同转换器的微放电阈值功率约为 8 400 W。



4 实验测试

使用矢量网络分析仪测量波同转换器的散射 参数。加工实物图及测量系统如图 7(a) 所示。 将 2 个波同转换器以"背靠背"方式(波导端法兰 螺纹连接为一体)连接进行测试,测试结果如图 7(b) 所示,与仿真曲线吻合。由于测试端口引入 2 个 转接头,插入损耗增大。在 4.0 GHz 频率点反射 系数为-18.7 dB,插入损耗为 0.3 dB。



图7 波导同轴转换器测量

微放电测试系统如图 8 所示,波同转换器是 在一个高真空室中完成的,前端为信号源,频率 为4 GHz,信号脉宽 100 μs。波同转换器后端接滤 波器,并用频谱仪检测输出信号。



1.信号源; 2.放大电路; 3.滤波电路; 4.耦合电路; 5.高真空室 6.滤 波器; 7.频谱仪

图8 微放电测试平台

第1次测得波同转换器微放电阈值为7kW, 再次抽真空测量后仅为2kW。更换L29同轴内 导体后,第3次测量结果恢复为7kW。说明微放 电位置确实在L29同轴处,且该波同转换的微放 电功率阈值达到了7kW,与仿真结果进行比较如 表2所示。实验结果表明,对于该波同转换器的 微放电发生区域分析方法正确,通过结构改进提 高了微放电功率容量。

表2 波同转换器微放电功率阈值测试结果

对比方案	1 W有效功率场强/(V·cm ⁻¹)	微放电阈值/W
仿真预测值	31.90	8 400
MC预测值	22.11	5 184
测量值	_	7 000

5 结论

本文针对高功率微波系统设计了一种后馈式 波导同轴转换器,并进行微放电分析和测试。

1) 在阶梯阻抗变换设计的基础上,改进同轴 内导体与阶梯块的过渡区域,增加了其功率容 量。"背靠背"测量结果并与仿真结果吻合,传输 性能良好。

2)提出了以器件结构为基础,从表面间距以 及峰值电场强度分析复杂微波器件微放电敏感区 域的方法,有助于定位微放电位置,并抑制微放 电现象的产生。

3) 测量得到波同转换器的微放电阈值功率突破 7 kW, 验证了方法的可行性, 为其空间应用打下基础。

参考文献:

- VAUGHAN J R M. Multipactor[J]. IEEE transactions on electron devices, 1988, 35(7): 1172–1180.
- [2] VAUGHAN R M. Secondary emission formulas[J]. IEEE transactions on electron devices, 1993, 40(4): 830.
- [3] CUI W Z, ZHANG H, LI Y, et al. An improved secondary electrons energy spectrum model and its application in multipactor discharge[J]. Chinese physics B, 2018, 27(3): 038401.
- [4] NGUYEN H K A, MANKOWSKI J, DICKENS J C, et al. Calculations of multipactor growth in rectangular waveguides[J]. IEEE transactions on plasma science, 2019, 47(2): 1364–1371.
- [5] CUI W Z, LI Y, YANG J, et al. An efficient multipaction suppression method in microwave components for space application[J]. Chinese physics B, 2016, 25(6): 068401.
- [6] 孙勤奋, 崔骏业, 吴春邦, 等. S 波段无源部件微放电测试 研究 [J]. 空间电子技术, 1999(3): 29-32, 38.
- [7] MONTERO I, MOHAMED S H, GARCÍA M, et al. Effect of surface reactions of low-energy carbon ions on the secondary electron emission of TiN:O thin films[J]. Journal of applied physics, 2007, 101(11): 113306.
- [8] WANG D, HE Y N, CUI W Z. Secondary electron emission characteristics of TiN coatings produced by RF magnetron sputtering[J]. Journal of applied physics, 2018, 124(5): 053301.

(下转第17页)

较,采用软件相移设计更加精确具体。

4)本设计采用 FPGA 作为信号处理芯片,与 以往使用单片机做的系统相比,功能更加丰富, 集成度更高,安全可靠性更好。

参考文献:

- [1] 曹林. 新型计轴式铁路信号轨道电路应用探讨 [J]. 安徽 冶金, 2012(2): 42-44.
- [2] 孟磊. 单侧计轴传感器电磁系统的分析与研究 [D]. 哈尔 滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 周应觉. 计轴设备在中国的发展 [J]. 铁路通信信号工程 技术, 2014, 11(5): 80-82.
- [4] 弓剑. 各类电子式计轴设备工程应用浅析 [J]. 铁道通信 信号, 2011, 47(6): 34-37.
- [5] 王耀. JWJ-C型微机计轴设备 [J]. 铁道通信信号,

1996(2): 8–9.

- [6] 孟维民, 郭万岭. 2000R 型无绝缘轨道电路红光带原因分析及解决措施[J]. 科学技术创新, 2019(11): 17–18.
- [7] 吴卉, 李隽鹏, 王浩, 等. ACS2000 型计轴系统在地铁信 号中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2015(3): 105–106.
- [8] 姜德生,何伟.光纤光栅传感器的应用概况 [J].光电子·激光,2002,13(4):420-430.
- [9] 李维来, 潘建军, 范典. 光纤光栅列车计轴系统的数据采 集与处理 [J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 13-15.
- [10] 柯江民, 孙淑霞, 曹屹东. MCP2515 及 CAN 通信驱动设计 [J]. 铁路计算机应用, 2008, 17(12): 43-45.
- [11] 王继国, 吉吟东, 孙新亚. CAN 总线控制器 MCP2515 的 原理及应用 [J]. 电测与仪表, 2004, 41(1): 52-56.
- [12] 石鹏. 铁路信号系统轨道电路分路不良的危害及防治策 略探析 [J]. 数字通信世界, 2019(5): 74, 140.

本文引用格式:

张忠民, 李扬, 周文生. 基于 FPGA 的计轴信号处理系统 [J]. 应用科技, 2020, 47(6): 9–17. ZHANG Zhongmin, LI Yang, ZHOU Wensheng. Axle counting signal processing system based on FPGA[J]. Applied science and technology, 2020, 47(6): 9–17.

(上接第8页)

- [9] ROZARIO N, LENZING H F, REARDON K F, et al. Investigation of Telstar 4 spacecraft Ku-band and C-band antenna components for multipactor breakdown[J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1994, 42(4): 558–564.
- [10] YANG J, CUI W Z, XIE G B, et al. Nanofabrication techniques used for suppressing multipactor in space applications[C]//2018 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). Hangzhou, China, 2018: 241–244.
- [11] 曹桂明, 王积勤. 微放电效应部件设计研究 [J]. 宇航计 测技术, 2004, 24(6): 45-48, 55.
- [12] ZHANG N, CAO M, CUI W Z, et al. Effect of rough surface morphology on secondary electron emission from metal surface[J]. Japanese journal of applied physics, 2017, 56(7): 075802.
- [13] 魏振华, 田立松, 冯旭东, 等. 8-18 GHz 同轴-波导转换 器的分析与设计 [J]. 微波学报, 2008, 24(S1): 125–128.
- [14] LEVY R, HENDRICK L W. Analysis and synthesis of inline coaxial-to-waveguide adapters[C]//2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No. 02CH37278). Seattle, USA, 2002: 809–811.

本文引用格式:

李继超, 陈潇杰, 刘长军, 等. C 波段波导同轴转换器设计及其微放电功率阈值 [J]. 应用科技, 2020, 47(6): 5–8, 17. LI Jichao, CHEN Xiaojie, LIU Changjun, et al. Design of a C-band waveguide coaxial converter and study on its multipactor power threshold[J]. Applied science and technology, 2020, 47(6): 5–8, 17.