

文章编号: 0490-6756(2006)05-1027-04

一种波导同轴转换器特性的数值模拟

刘长军, 闫丽萍, 徐 兰, 赵国华

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要: 对一种波导同轴转换器进行了数值模拟, 得到了转换器的频率响应和功率容量, 与实验结果相符. 数值模拟表明: 转换器探针的精细结构会对计算结果产生很大影响; 在大功率微波注入时, 微波击穿将首先发生在转换器探针的底部.

关键词: 散射参数; 矩量法; 微波击穿

中图分类号: O451 **文献标识码:** A

1 引言

波导同轴转换器是微波系统中的一个部分, 承担从天馈到接收或发射系统的连接任务, 通常完成矩形或圆波导到同轴线的转换功能. 当微波系统受到雷电脉冲(LEMP)或核电磁脉冲(NEMP)的作用, 可能导致系统前端被破坏. LEMP的低端频谱较强^[1], 以通过电缆耦合进入系统为主. NEMP含有相对丰富的高频分量^[2], 通过天馈耦合进入微波系统. 微波在大气中传播规律和击穿现象已有研究. 文^[3]推导出微波大气传播“尾蚀”效应和“逃逸”时间的解析表达式. 文^[4]给出了一定条件下波导发生微波击穿的电场强度阈值. 在常温和一个标准大气压下, 大气微波击穿的场强阈值约为 $1\sim 3\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ^[4-6]. 文^[4]实验对比了大气中和波导中的微波击穿场强阈值, 发现两者基本相同.

国外正在开展波导微波击穿的相关研究. 美国空军实验室研究了小于 1.5GW 高功率微波在 Vlasov 天线系统中的微波击穿, 获得了不同气压下微波脉冲击穿的功率阈值^[7]. 美国学者还有在 X 波段进行波导内微波击穿实验研究的报道^[8]. 瑞典学者则研究了不同调制和载波情况下射频空气击穿的现象^[9].

我们对一种矩形波导同轴转换器进行了数值模拟, 得到其两端口网络散射参数的频率响应特性, 与实验结果吻合较好. 通过模拟计算获得了波导同轴转换器内的电磁场分布, 确定首先发生微波击穿的位置在探针底部与波导壁之间, 并计算了转换器能够传输的最大微波功率, 为研究微波脉冲破坏电子系统的研究提供了参考.

2 建模与模拟计算方法

我们研究的波导同轴转换器的波导部分为 BJ40 标准波导, 长边 $a=58.2\text{mm}$, 窄边 $b=29.1\text{mm}$, 转换器的长度 $c=29.4\text{mm}$. 金属探针分为三段圆柱, 直径分别为 $d_1=3.84\text{mm}$, $d_2=2.10\text{mm}$ 和 $d_3=1.10\text{mm}$, 其中探针顶部有半径为 $r=0.5\text{mm}$ 的倒角. 随机选择同型号的 5 个转换器测量尺寸取平均值, 建立转换器的几何模型. 图 1 为根据实测数据, 使用 AutoCAD 建立的波导同轴转换器的几何模型.

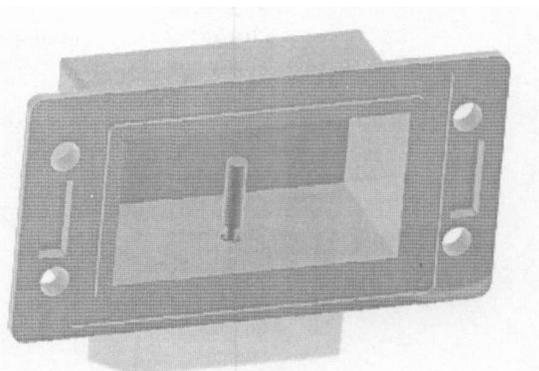


图 1 波导同轴转换器的几何模型

Fig. 1 Geometry model of the waveguide adapter

收稿日期: 2005-09-22

(基金项目: 国家自然科学基金资助(60301004))

波导同轴转换器的探针为黄铜,波导壁为铝.取黄铜的电导率为 $\sigma_{Cu}=1.47 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$,铝的电导率为 $\sigma_{Al}=3.60 \times 10^7 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$.同轴线内填充的介质为聚四氟乙烯,相对介电常数为 $\epsilon_r=2.06$,忽略其介质损耗.在转换器几何模型的基础上,确定各材料的介电常数和电导率,进行非均匀网格剖分建立转换器的电磁模型.在获得了转换器的几何模型和电磁模型后,分别定义波导和同轴线的横截面作为两个端口,就可以使用矩量法进行数值模拟转换器的两端口网络散射参数.

波导同轴转换器的探针顶部倒角半径为 $r=0.5 \text{ mm}$.数值模拟计算表明:由于探针顶部电场强度高且梯度大.如果不考虑探针顶部的倒角,对转换器频率特性会产生较大影响,还会导致不正确的微波击穿位置,转换器微波传输功率容量也出现较大误差.在建立模型时必须考虑金属探针顶部的倒角,在探针顶部、探针同轴线连接等精细结构处进行非均匀网格划分,减少模拟计算对计算机资源的需求,提高数值模拟计算的效率和精度.

使用矩量法的数值计算对转换器进行电磁场数值仿真,利用迭代法求解矩量法产生的满秩矩阵.由于矩量法是一种频域的算法,需要依次对每一个频点进行模拟计算,才能得到转换器在一个频带内散射参数的频率响应特性.在网格划分中,使用三角形和四边形的单元网格,控制最大单元边长小于 $\lambda/20$.

3 实验测量和模拟计算结果

使用标准 SMA-J 接头连接波导同轴转换器,将两个转换器在 BJ40 波导开口面上对接,使用 Agilent E8362B 微波矢量网络分析仪进行 2GHz 到 6GHz 的扫频测量.图 2 比较了 S 参数的测量结果和模拟计算结果,两者基本符合. $|S_{11}|$ 的两个峰值频率和幅度都基本吻合. $|S_{21}|$ 的模拟计算结果与实际测量结果在高端频率存在较大误差. $|S_{21}|$ 的模值测量数据在 5GHz 开始下降,但是 S_{11} 并没有升高到相应的幅度,反而在接近 6GHz 附近也开始下降.这可能是由于转换器内壁生成了氧化物,导致转换器在高频端插入损耗增加.

如果不考虑探针顶部的倒角,数值模拟计算表明,微波场强最高的区域为探针顶部,微波击穿将发生在该区域.但是在探针顶部增加了一个半径为 $r=0.5 \text{ mm}$ 的倒角后,发现场强最高的区域从探针顶部转移到探针低部.在 3GHz 的微波激励下,在波导同轴转换器中心纵剖面上对比电场强度的分布:无倒角结构的电场强度分布如图 3(a) 所示;加入倒角后,电场强度如图 3(b) 所示,电场强度最大的区域位于探针底部.无倒角结构的计算结果显示场强最大位置为探针顶部,但是此时电场强度计算的数值已经不可靠了,结果显示电场分布已经具有一定的离散性.

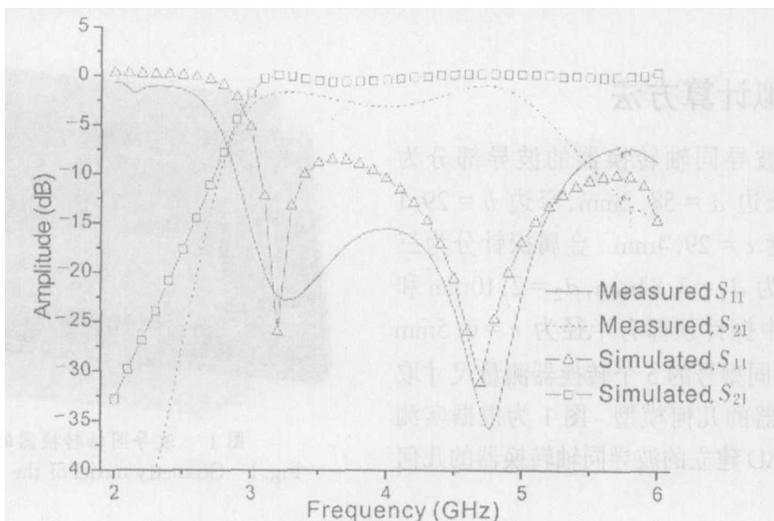
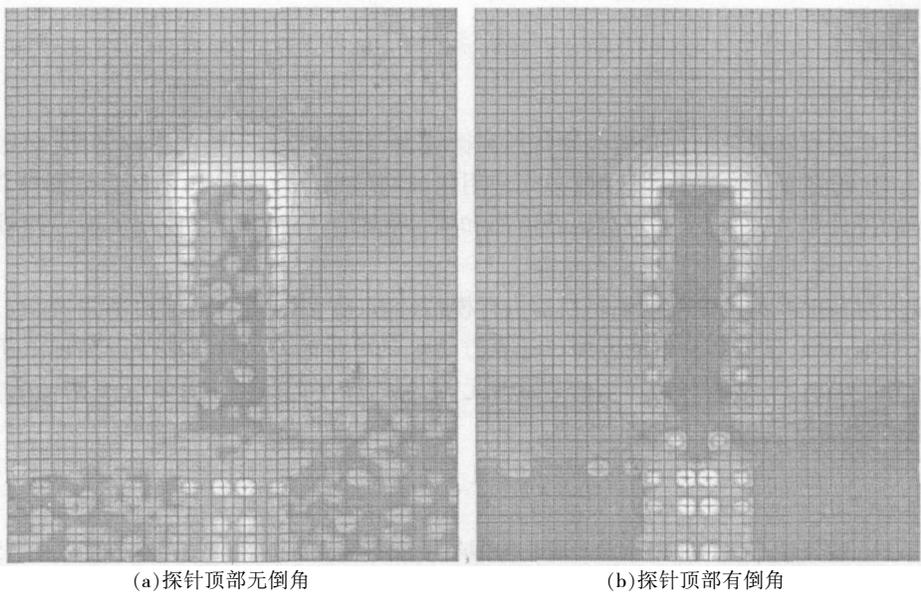


图 2 S 参数的测量和数值模拟结果比较

Fig. 2 Comparison of measured and simulated S parameters



(a) 探针顶部无倒角 (b) 探针顶部有倒角

图 3 转换器内电场强度分布对比

Fig. 3 Electric field distribution inside the adapter

4 微波击穿功率的确定

在波导或波导同轴转换器中,如果发生电子场致发射,微波击穿的场强阈值将与频率、金属表面、器件结构等多种因素相关.在通常条件下,微波场强小于电子场致发射的场强阈值,所以可以把大气微波击穿的场强阈值作为波导结构的微波击穿场强阈值.

在常温和一个标准大气压下,大气击穿的微波平均功率密度 S_{th} 为^[5]

$$S_{th} = \frac{1.428 \times 10^{-6}}{\tau_p} (f^2 \times 10^{-18} + 7.377 \times 10^5) [1.434 \times 10^8 \tau_p + \ln(1.241 f^2 / n_a)] \quad (1)$$

式中, τ_p 为微波脉冲的宽度, f 为微波频率, n_a 为种子电子密度.根据坡印亭定理确定大气微波击穿的场强 E_{th} 为

$$E_{th} = \sqrt{2 \mu_0 S_{th} / \epsilon_0} \quad (2)$$

式中, μ_0 为空气的导磁率, ϵ_0 为空气的介电常数.图 4 给出了大气中的微波击穿场强阈值随脉冲宽度的变化.对于波导同轴转换器,实际的击穿阈值会小于大气的微波击穿功率阈值.对于 20ns 脉宽 3GHz 的微波,可以参考微波击穿的电场强度约为 $1.4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$.

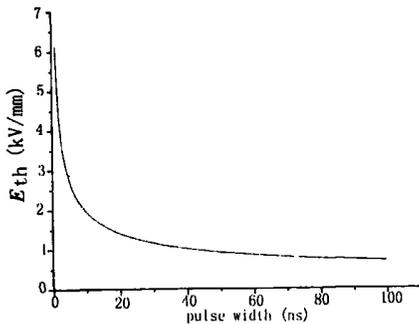


图 4 3GHz 微波大气击穿场强阈值随脉冲宽度的变化
Fig. 4 Microwave breakdown varied with pulse widths at 3GHz

微波击穿将首先发生在转换器中场强最高的区域.在模拟计算中可以得到波导截面上的电场强度和击穿位置的电场强度间的线性关系.根据微波大气击穿的阈值场强,就可以计算穿过波导截面的微波传输功率 P_w 为

$$P_w = \sum_{i=1}^n \frac{\sin \theta_i}{2} |E_i| \cdot |H_i| \cos \varphi_i \quad (3)$$

式中, n 为波导截面上单元总数, θ_i 为第 i 个单元中电场和磁场的夹角, φ_i 为电场和磁场的相位差, $|E_i|$ 和 $|H_i|$ 分别表示切向电场强度和切向磁场强度的模值.

通过计算得到通过波导同轴转换器的最大微波功率.在不同频率下计算转换器电磁场的分布,就可以得到相应的微波功率容量.对于 3GHz 脉冲宽度为 20ns 的微波,可以得到转换器的微波击穿功率阈值为

2kW.

5 结果讨论

波导同轴转换器探针顶部的倒角对频率特性和微波击穿阈值都有很大的影响,并且会影响对微波击穿位置的确定.在场强变化梯度大的区域,必须使用精细网格划分才能得到可靠的仿真计算结果.在波导同轴转换器的设计中,需要特别注意对探针顶部和探针底部结构的改进.使用了波导同轴转换器的微波实验系统设计也可以参考本文结果.

采用矩量法对其他类型的波导同轴转换器进行模拟计算,得到的微波击穿功率阈值和击穿的位置与相关实验结果基本一致,证明本文中的模型和计算方法都是可行的.对微波大气击穿现象还需要进一步进行理论分析和实验研究,探索对特定结构的微波无源器件,在不同条件下计算功率阈值的方法,以提高模拟计算的准确度.

参考文献:

- [1] 田明宏,盛松林,魏光辉,等.雷电回击参数对回击电磁场计算的影响研究[J].强激光与粒子束,2003,15(6):599.
- [2] 谢彦召,王赞基,王群书,等.高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J].强激光与粒子束,2003,15(8):781.
- [3] 江少恩.高功率微波大气击穿理论分析与计算[J].量子电子学,1996,13(3):278.
- [4] 刘静月,方进勇,宋志敏,等.短脉冲高功率微波大气击穿研究[J].强激光与粒子束,2000,12(4):497.
- [5] 周光镒,朱红刚.高功率微波大气传输的一些规律[J].强激光与粒子束,1996,8(4):485.
- [6] 段耀勇,陈雨生.高功率微波脉冲大气击穿及其对能量传输的影响[J].微波学报,2000,16(3):260.
- [7] Hendricks K J. HPM investigation of gas breakdown[C]. Orlando: Florida, 2002.
- [8] Dolgashev V A, Tantawi S G. RF breakdown in X-band wave guide[C]. Paris: France, 2002.
- [9] Jordan U, Semenov V E, Anderson¹ D, et al. Microwave breakdown in air for multi-carrier, modulated or stochastically time varying RF fields[J]. J.Phys.-D: Appl. Phys, 2003,36:861.

Numerical Simulation on a Waveguide to Coaxial Line Transformer

LIU Chang-jun, YAN Li-ping, XU Lan, ZHAO Guo-hua

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 61064, China)

Abstract: Numerical simulation on a waveguide to coaxial line transformer is presented. The achieved results of frequency responses and power capacity agree with experiments. The numerical results show that the fine structure of the probe plays an important role, which may affect not only the power capacity but also the scattering parameters. When high power microwave is induced to the transformer, microwave breakdown will first occur at the end of the probe.

Key words: scattering parameters; method of moment; microwave breakdown