

同轴连接器工作频带的影响因素

彭峰¹ 胡照文¹ 张艳丹¹ 周克省¹ 邓联文^{1,2}

(1. 中南大学物理与电子学院 长沙 410083; 2. 中南大学粉末冶金国家重点实验室 长沙 410083)

摘要: 基于电磁场理论求解同轴连接器的截止频率,在同轴连接器与同轴电缆阻抗相匹配的前提下,利用MATLAB软件绘制网格图分析和研究了同轴连接器的内导体外径、外导体内径以及填充介质相对介电常数对其上限工作频率的影响规律,并提出了3种有效展宽工作频带的途径。该文还对固定尺寸的同轴夹具这类特殊的连接器在材料电磁参数测量领域的应用进行了研究,结果表明,填充在同轴夹具中的待测样品难以使得连接器和电缆的阻抗严格匹配,并且随着待测试样介电常数 ϵ_r 的提高,同轴连接器的工作频带随之缩小 $1/\sqrt{\epsilon_r}$ 。

关键词: 同轴连接器;截止频率;阻抗匹配;工作频带;MATLAB

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Influential factors of coaxial connector's working frequency band

Peng Feng¹ Hu Zhaowen¹ Zhang Yandan¹ Zhou Kesheng¹ Deng Lianwen^{1,2}

(1. Institute of physics and electronics of Central South University, Changsha, 410083, China;

2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The cut-off frequency is solved based on electromagnetic field theory, and network line is presented to analyze the relationships among coaxial connector's cut-off frequency, the outer diameter of the inner conductor, the inner diameter of the outer conductor and the relative permittivity of the filled medium on the condition that impedance matched between coaxial connector and coaxial cable, which shows their relationships apparently. Finally, Three ways proposed so as to expand its working frequency band effectively. In addition, coaxial fixture at fixed size is studied in the field of electromagnetic parameters measurement, the result has shown that samples filled in the coaxial fixture are difficult to make the connector's impedance exactly match with cable's, and coaxial connector's working frequency band reduces while the permittivity of test samples improved.

Keywords: coaxial connector; cut-off frequency; impedance matching; working frequency band; MATLAB

1 引言

微波同轴连接器在微波传输系统中,进行电缆之间、电缆与电子设备之间和微波元器件之间的连接和匹配。随着微波技术的飞速发展,尤其是军用电子设备的发展和需求,电子系统的使用频率愈来愈高,微波同轴连接器不断向宽频带、小型化和多功能方向发展。

目前美、法、日、德等发达国家的微波同轴连接器的研制技术处于世界领先地位,我国同轴连接器的研究起步于60年代初,于80年代后期,参照美军标同轴连接器总规范MIL-C-39012,并在此基础上加以创新,制定了GB11313射频频连接器国标和GJB680、GJB681射频频同轴连接器国军标。国外McLean J. S^[1]等人、Andreas Tag^[2]等人分别研究了电

磁波在同轴线中的传播和0~110 GHz宽带范围内同轴连接器的设计、仿真与制造。国内苏太东等人^[3]、王得宇等人^[4]对常见的同轴连接器若干系列的工作频带进行了研究。国内其他学者还求解了同轴线的截止波长和特性阻抗,探讨了降低电压驻波比、提高信号传输效率的方法,并对同轴连接器的失效原因进行了总结^[5-11]。然而在材料电磁参数测量领域,测量工作者在同轴测试夹具这种常见的同轴连接器的使用过程中,容易忽略其工作频率范围,造成测量的电磁参数存在较大偏差。这制约着对借助计算机进行吸波材料辅助优化设计的研究和以实验为主的微波吸收材料的研究。因此,论文集中解决的是同轴连接器的尺寸和填充介质对工作频带的定量影响,进而确定固定尺寸下的同轴连接器的工作频带。

2 理论基础

2.1 同轴连接器尺寸的选择

同轴连接器作为微波传输系统的重要组成部分,其尺寸要和与之相连接的同轴电缆适配。同轴电缆尺寸的选择理论上要求在给定的工作频带内只传输 TEM 波型。在实际应用中,当工作波长接近于同轴线的横向尺寸时,同轴电缆内会出现 TE 或 TM 高次波型,这会造成信号传输功率的很大衰减和信号的失真传输。因而在满足一定的功率容量和较低损耗的情形下,宜尽量遏制高次波型的传输。而高次波型 TE₁₁ 是包含 TE 和 TM 波型在内的所有高次波型中截止波长 λ_c 最长的一种波型,对 TE₁₁ 波型,其截止波长^[12]:

$$\lambda_c \approx \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (1)$$

式中: D 为同轴线外导体内径, d 为同轴线内导体外径, 则其尺寸大小宜满足:

$$D+d \approx \frac{2\lambda_c}{\pi} = \frac{2C_0}{\pi f_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

(注:对一般非磁性介质, $\mu_r \approx 1$)

2.2 同轴连接器的特性阻抗

根据电场和磁场的表示式,可求出同轴电缆的特性阻抗为^[12]:

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{D}{d} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (3)$$

若同轴电缆中填充的为非磁性介质,则其特性阻抗即为:

$$Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (4)$$

2.3 同轴电缆的衰减

在微波频率范围内,传输线须选取导电性良好的导体,填充介质选取介质损耗特别小的优良绝缘体。同轴线的衰减主要由以下两部分组成^[12]:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d \approx \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2} \quad (5)$$

式中: α_c 为同轴线导体的衰减常数, α_d 为填充介质的衰减常数, R 、 L 、 C 、 G 分别为同轴线单位长度的电阻、电感、电容和漏导, Z_0 为同轴线的特性阻抗。一般来说,介质损耗相对导体损耗可忽略不计。则:

$$\alpha \approx \alpha_c \approx \frac{R}{2Z_0} \quad (6)$$

若令 R_{sr} 为同轴线内外导体的表面电阻率,则:

$$R = \frac{R_{sr}}{\pi D} + \frac{R_{sr}}{\pi d} \quad (7)$$

联立式(6)和式(7),则有:

$$\alpha \approx \frac{R}{2Z_0} = \frac{R_{sr}}{\eta \ln \frac{D}{d}} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \quad (8)$$

对 α 关于 D 求导(关于 d 求导可得同样结果),则有:

$$\frac{d\alpha}{dD} = R_{sr} \left[\frac{-\frac{\eta}{D^2} \ln \frac{D}{d} - \frac{\eta}{D} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right)}{\left(\eta \ln \frac{D}{d} \right)^2} \right] \quad (9)$$

欲求得最小的损耗,令 $\frac{d\alpha}{dD} = 0$, 对损耗 α 求极值,

则有:

$$-\frac{1}{D^2} \ln \frac{D}{d} - \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right) \frac{1}{D} = 0 \quad (10)$$

化简整理可得:

$$D+d = D \ln \frac{D}{d} \quad (11)$$

不妨设 $D/d = k$, 解得 $k \approx 3.6$

2.4 同轴电缆的传输功率

电磁波沿同轴电缆轴向通过横截面 S 所传输的有功功率应为复数坡印廷矢量在横截面 S 上积分的实部^[12], 即:

$$P = \frac{1}{2} R_c \left[\int_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{d}\mathbf{S} \right] = \frac{\pi(E_0 d)^2}{4\eta} \ln \frac{D}{d} \quad (12)$$

对传输功率 P 关于 d 求导,则有:

$$P' = \frac{\pi E_0^2 d [2 \ln(D/d) - 1]}{4\eta} \quad (13)$$

欲求得最大的传输功率,令 $P' = 0$, 对传输功率求极大值,则有:

$$D/d = e^{0.5} \approx 1.6487 \quad (14)$$

若对同轴电缆的传输功率 P 关于 D 求导,则有: $\frac{dP}{dD} =$

$$\frac{\pi(E_0 d)^2}{4\eta D} > 0 \text{ 恒成立, 即同轴连接器的传输功率随外导体内}$$

径的增大单调递增,而在实际应用中需综合各方面的因素,外导体内径是受限的。

综上所述,同轴传输系统中要求较小的损耗和大的传输功率,在尺寸上是不一致的。因此在使用过程中应视具体情况满足最主要性能或兼顾所有性能采取折中方案以确定同轴线尺寸。

3 分析与讨论

由式(2)可得,同轴连接器在与同轴电缆阻抗匹配的前提下,其截止频率和内导体外径、外导体内径以及填充介电常数的关系为:

$$f_c = \frac{C}{\lambda_c} \approx \frac{2C_0}{\pi(D+d)\sqrt{\epsilon_r}} \quad (15)$$

据式(15)可知,缩小 D 、 d 、 ϵ_r 的值,同轴连接器的截止频率值就会增大,然而不能同时缩小这三者的值,否则会导致连接器与同轴电缆的阻抗失配。

不妨设同轴线特性阻抗为 50Ω , 为了与之进行匹配,同轴连接器的特性阻抗也设为 50Ω , 那么同轴线外导体内径与内导体外径和填充介质的相对介电常数的关系满足

下式:

$$Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d} = 50 \text{ 即 } D = d e^{\frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2}} \quad (16)$$

1) 若保持 ϵ_r 不变,欲提高截止频率,则要减小 D 、 d 的值。同时要保证 Z_0 不变,亦即 $\ln(D/d)$ 不变。于是要求 D 、 d 同比例缩小,且该比例为 $e^{\frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2}}$ (此时为一常数)。截止频率在填充材料不变的情形下,和内导体外径以及外导体内径的相互关系如表 1 所示。

表 1 阻抗匹配时保证填充材料不变的情形下截止频率的变化

填充材料	相对介电常数	内导体外径 d	外导体内径 D	频率 f/GHz
空气	1	3.04	7	19.01
空气	1	6.08	14	9.51
空气	1	9.12	21	6.34

2) 若保持 d 不变,欲提高截止频率,同时要保证 Z_0 不变,则 D 、 ϵ_r 的值均相应减小。截止频率在内导体外径不变的情形下,和填充材料以及外导体内径的相互关系如表 2 所示。

表 2 阻抗匹配时保证内导体外径不变的情形下截止频率的变化

填充材料	相对介电常数	内导体外径 d	外导体内径 D	频率 f/GHz
空气	1	3.04	7	19.01
聚四氟乙烯	2.1	3.04	10.17	9.97
聚乙烯	2.26	3.04	10.64	9.28

3) 若保持 D 不变,欲提高截止频率,则要减小 ϵ_r 或 d 的值。据式(16)可知,同时要保证 Z_0 不变,则 ϵ_r 、 d 的值必有一个减小,另一个增大,两者呈现一种此消彼长的关系。截止频率在外导体内径不变的情形下,和填充材料相对介电常数以及内导体外径的相互关系如表 3 所示。

表 3 阻抗匹配时保证外导体内径不变的情形下截止频率的变化

填充材料	相对介电常数	内导体外径 d	外导体内径 D	频率 f/GHz
空气	1	3.04	7	19.01
聚四氟乙烯	2.1	2.09	7	14.48
聚乙烯	2.26	2	7	14.10

基于 MATLAB 软件对其进行编程和图像化处理^[8],考虑到变量较多,在此做降维处理,把内导体外径和填充介质的相对介电常数视作自变量,外导体内径作为中间变量,截止频率作为因变量。

如图 1 所示,同轴线外导体的内径 D 随内导体外径、填充介质的相对介电常数的增大逐渐增大。当所填充介质的

相对介电常数一定时, D 随内导体外径的增大而线性增大,线性斜率为 $e^{\frac{\sqrt{\epsilon_r}}{2}}$; 当内导体外径较小时, D 与 ϵ_r 的关系曲线的斜率随着 ϵ_r 的增大缓慢增大,随着内导体外径 d 的增大, D 与 ϵ_r 的关系曲线的斜率随着 ϵ_r 的增大急剧增大。

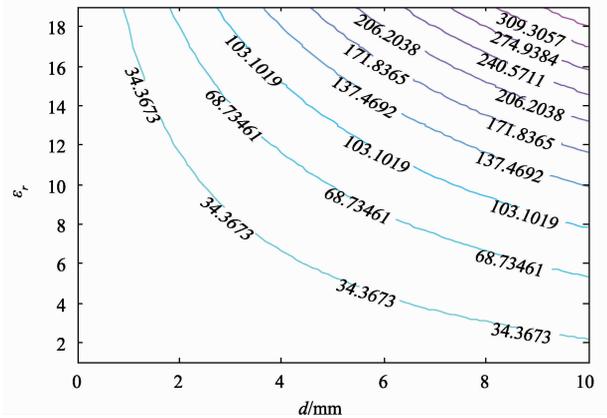
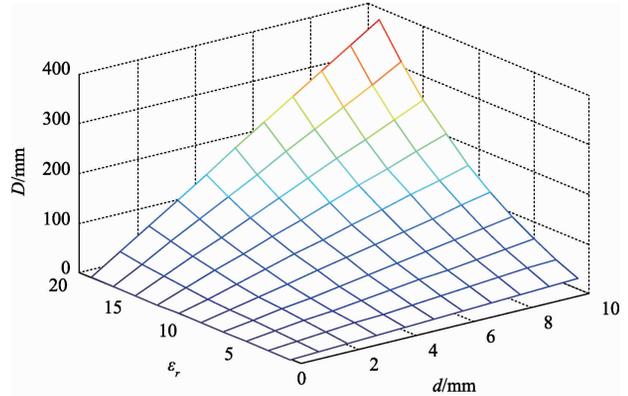
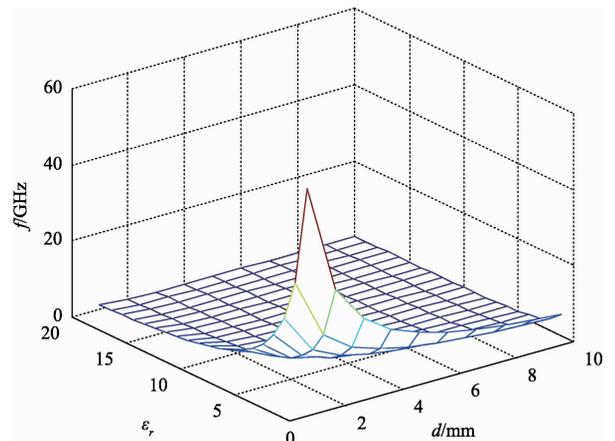


图 1 外导体内径与内导体外径和填充介质的相对介电常数的关系

如图 2 所示,同轴连接器的截止频率随 d 、 ϵ_r 的增大而减小。当 $d \in (0, 5)$ 、 $\epsilon_r \in (0, 10)$ 时, f 随 d 、 ϵ_r 的增大均急剧减小,在该范围以外, f 随 d 、 ϵ_r 的增大缓慢减小甚至几乎不变。



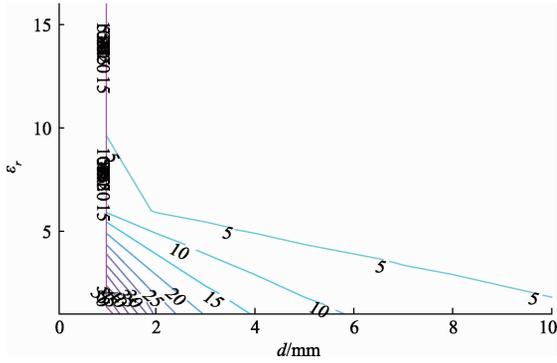


图2 截止频率与内导体外径和填充介质的相对介电常数的关系

4 结 论

同轴连接器工作频带的影响因素主要是同轴连接器的外导体内径、内导体外径以及填充其中的介质。兼顾到同轴连接器和同轴电缆的阻抗匹配,提高同轴连接器的工作上限频率,拓宽同轴连接器的工作频带可以采用以下3种方式:

- 1)在填充材料不变的前提下,同比例缩小外导体内径和内导体外径值;
- 2)在内导体外径不变的前提下,减小外导体内径和填充介质相对介电常数的值;
- 3)在外导体内径不变的前提下,减小填充介质相对介电常数的值、相应增大内导体外径的值。

同轴连接器在尺寸固定的前提下,使用过程中宜注意所填充介质对工作频带的影响,若所填充介质的相对介电常数过大,则会造成连接器与电缆的阻抗失配,使信号传输过程中出现高次谐波,极大降低同轴连接器工作的有效频带。

参考文献

[1] MCLEAN J S, MEDINA A, SUTTON R, et al. Directional dependence of the minimum-phase property of the TEM horn transfer function[M]. Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 10. Springer New York, 2014: 179-187.

[2] ANDREAS T, JENS L, GERD H, et al. Design, simulation, and fabrication of broadband coaxial matched loads for the frequency range from 0 to 110GHz[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2014: 1-8.

[3] 苏太东,张宿,王国宁,等. SMA型超轻射频同轴连接器的设计[J]. 集成电路应用, 2012, 14(7): 29-32.

[4] 王得宇. 同轴电缆特性分析和测量研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(增刊2): 467-470.

[5] 冯良平,徐岚. 射频同轴连接器设计要点[J]. 国外电子测量技术, 2005, 24(11): 39-44.

[6] 金静,逯迈,陈小强. Matlab求解方同轴波导的截止波长和特性阻抗[J]. 现代电子技术, 2008, 31(3): 100-102.

[7] 曹良足,孙敏松. 串联谐振法测量1/4波长介质同轴谐振器的特性参数[J]. 电子测量技术, 2007, 30(10): 64-65.

[8] 何霞,陈梦魁. 基于Matlab的同轴空气线相关理论值的探讨和推算[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 46-48.

[9] 李明德. 降低射频同轴连接器电压驻波比的方法探讨[J]. 机电元件, 2011, 31(3): 33-59.

[10] 张永虎. 射频同轴连接器的失效原因分析及提高其可靠性的方法[J]. 电子质量, 2006(10): 25-28.

[11] 李传龙. 射频同轴连接器电缆组件功率参数的测量[J]. 机电元件, 2007, 27(1): 50-53.

[12] 闫润卿,李英惠. 微波技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2011.

作者简介

彭峰,硕士研究生。主要研究方向为微波测量,电磁波散射理论与技术研究。

E-mail: pengfeng@csu.edu.cn

邓联文,博士,中南大学教授。主要研究方向电子通信、吸波、隐身材料等。

E-mail: dlw626@163.com