

【文章编号】 1004-1540(2010)02-0099-05

SE 同轴测试装置中阶梯电容的研究与优化

陈超婵^{1,2}, 赵吉祥¹, 桑 昱², 陆福敏²

(1. 中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 上海计量测试技术研究院, 上海 201203)

【摘要】 在屏蔽材料的屏蔽效能(shielding effectiveness, SE)测试装置中,通过对锥形连接器内导体进行微小移位,优化固定同轴装置的支撑介质的内、外径比值,并在支撑介质中挖去一定厚度的环形沟道构成小电感等技术对阶梯电容进行补偿,减小由截面不连续引起的回波损耗,设计了频率范围为10 MHz至3 GHz的SE同轴测试装置.利用软件仿真验证了表面电阻为 $5\ \Omega$ 的屏蔽材料在该装置中测试有稳定的SE值,证明该装置不仅改善了基于ASTM D4935测试装置频率范围窄的不足,同时具备良好的阻抗匹配特性.

【关键词】 屏蔽效能;阶梯电容;回波损耗;锥形过渡器;支撑介质

【中图分类号】 TN06

【文献标识码】 A

The optimization of step capacitance in SE coaxial testers

CHEN Chao-chan^{1,2}, ZHAO Ji-xiang¹, SANG Yu², LU Fu-min²

(1. College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Institute of Measurement and Test Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: Tapering transitions were commonly used to connect coaxial fixtures and N-type coaxial interfaces in SE (shielding effectiveness) coaxial testers. Now, it has been optimized by shifting the inner conductors moderately, setting the ratio of inner and outer diameters of the brace mediums, and digging small rings in the brace mediums contact with the air to compensate the step capacitances. An SE coaxial tester with a wider frequency range from 10 MHz to 3 GHz was developed and its stable characteristics were validated by commercial soft HFSS at the sheet resistance of shielding material of $5\ \Omega$. This tester not only overcomes the narrow operating band of the ASTM D4935 testing method but also matches well.

Key words: shielding effectiveness; step capacitance; return loss; tapering connector; brace medium

【收稿日期】 2010-05-13

【基金项目】 上海市科委资助项目(No. 08DZ0501800),浙江省自然基金杰出青年团队项目(No. R105248),国家标准化公益专项项目(No. 200810461),国家自然科学基金资助项目(No. 10802082),浙江省自然科学基金资助项目(No. Y6090008)

【作者简介】 陈超婵(1986-),女,浙江苍南人,硕士研究生.主要研究方向为屏蔽材料的测试与分析.

电磁辐射对人体健康方面的危害包括热效应、非热效应和累积效应^[1]。人们生活在一个充斥着电磁辐射的空间里,随时受到电磁辐射的干扰与影响。因此,如何防止电磁辐射对人及其它生物体的危害成为一个热门话题。今天,各种防电磁辐射屏蔽材料应运而生,但市场上生产的防电磁辐射屏蔽材料良莠不齐;而且通过其他参数特性判定屏蔽材料屏蔽电磁波的能力又比较复杂,因为平面电磁波通过屏蔽材料时被反射、吸收、多重反射^[2],如图1。

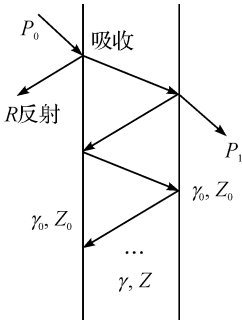


图1 平面电磁波在屏蔽材料中的传播原理

Figure 1 Shielding mechanism of single layer material in coaxial tester

根据电磁场辐射区域划分,屏蔽效能的测试方法主要分为远场法、近场法和屏蔽室法。其中远场法中 ASTM D4935^[3]法兰同轴传输线法最成熟,如图2。但基于 ASTM D4935 的法兰同轴传输线法测量 SE 的频带窄(频率上限仅为 1.5 GHz),不能准确测量在高频段范围的 SE,无法满足现代设备高频段检测的需求。

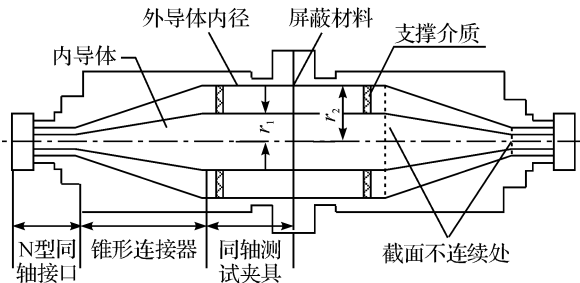


图2 ASTM D4935 的法兰同轴传测试装置

Figure 2 ASTM D4935 flanged coaxial tester

本文对此作了改进,将 SE 同轴测试装置的频率上限提高到 3 GHz。在设计过程中,需要考虑由截面

不连续以及放置支撑介质的同轴线内、外导体槽所产生的阶梯电容对阻抗匹配的影响。通过对测试夹具中的锥形连接器,以及内、外导体槽深比与支撑介质模型进行优化设计,可使阶梯电容达到最小。最后,该模型的回波损耗小于 -34 dB,满足了测试要求。

1 模型设计及优化

如图2,电磁屏蔽材料 SE 同轴测试夹具由左右对称均为 50 Ω 的同轴线组成,中间放置待测屏蔽材料,通过法兰和尼龙螺钉将两部分装置通连在一起。装置末端为 2 个 N 型同轴接口,其中一个连接信号源,另一个连接信号接收机。

1.1 同轴测试夹具尺寸的确定

由于在同轴测试装置中模拟远场测试,要求同轴线中只传输平面波(TEM波)。当测试频率超过同轴装置的频率上限时,会产生高次模。在这些高次模中,截止频率最低的是 H_{11} 波。为确保同轴线中主模 TEM 波的单模传输,测试频率应该低于第一高次模 TE_{11} 波的截止频率。因此同轴夹具尺寸需满足下面 2 个条件^[4]:

1) 同轴测试夹具的特性阻抗 Z_0 (50 Ω) 保持不变,即 r_1, r_2 比值不变;

2) 在设备的最大操作频率 f_{\max} 范围内,只传播 TEM 主模。即 f_{\max} 需小于第一高次模 TE_{11} 波的截止频率 f_c :

$$Z_0 = (\eta_0 / 2\pi \sqrt{\epsilon_r}) \ln(r_2 / r_1) \quad (1)$$

$$f_c = \frac{c_0}{\pi(r_1 + r_2)} \quad (2)$$

整理式(1)(2),可得 r_1, r_2 尺寸:

$$r_1 = \left(\frac{c_0}{\pi f} \right)_c (1 + e^{2\pi Z_0 / \eta_0}) \quad (3)$$

$$r_2 = \left(\frac{c_0}{\pi f} \right) \left(1 - \frac{1}{(1 + e^{2\pi Z_0 / \eta_0})} \right) \quad (4)$$

式中: Z_0 —无耗同轴传输线的本征阻抗; c_0 —光速; f_c — TE_{11} 模的截止频率; η_0 —空气中的波阻抗; r_1 —内导体半径; r_2 —外导体内部半径。

实际运用中,为有效抑制高次模,常引用一保险系数,取 $f_{\max} = \frac{f_c}{1.1}$,因此 H_{11} 的截止频率 $f_c =$

3.3 GHz。整理得到 SE 同轴线的尺寸:

$$r_1 = 8.77 \text{ mm}$$

$$r_2 = 20.18 \text{ mm}$$

根据 ASTM D4935 的模型仿真,在频率范围 30 MHz 至 1.5 GHz 之间,回波损耗(RL) < -30 dB,如图 3,视为在同轴测试装置中无损传输.但频率上限为 3 GHz 的模型按图 2 标准设计,损耗十分严重,如图 5(b).产生损耗的主要原因是截面不连续以及支撑介质的插入产生的阶梯电容对反射的影响.如何使阶梯电容达到最小,是本文的主要目的.

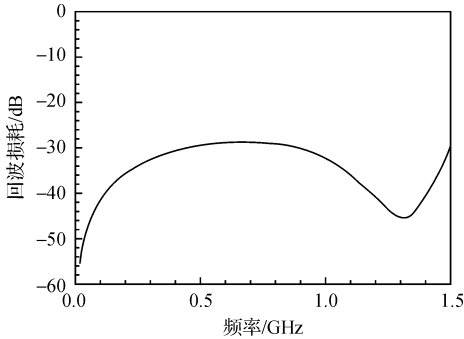


图 3 ASTM D4935 同轴测试装置的回波损耗
Figure 3 Return loss of ASTM coaxial tester

1.2 锥形连接器的优化设计

在同轴测试装置中,设计的尺寸满足均匀 50Ω 的特性,装置末端为 N 型同轴接口,外导体内径 $a_2 = 3.5$ mm,内导体半径 $a_1 = 1.52$ mm,这就导致两部分同轴线的尺寸不一致,直接将两段连接在一起,产生截面突变,如图 4.这种突变产生的阶梯电容,极大地引起 TEM 波的反射^[5],从而影响整个测试装置的时域阻抗,需要对该突变部分进行适当的修正.

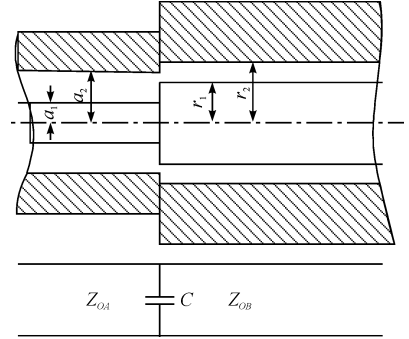
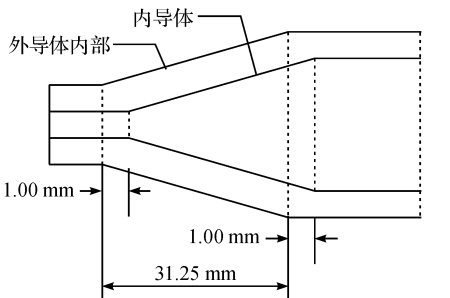


图 4 导体界面突变及其等效阶梯电容

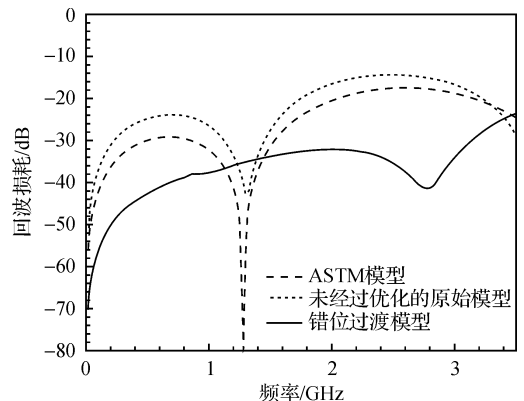
Figure 4 Discontinuity in conductor section and its equivalent step capacitance

通过采用一定长度的过渡段,将两段截面不同的同轴线采用渐变方式连接能大大减小损耗.常用的过渡方式分为阶梯式和渐变式,其功能都是减小反射,使阻抗达到匹配.直角阶梯过渡不适用于外导体内径与内导体直径比值大的情况;渐变式有指数型、锥形等,但指数型曲线在加工上会产生一定的难度.为便于加工,采用锥形过渡方式.

锥形过渡段斜率太大或太小对阻抗匹配均有一定影响,我们通过参扫优化得到内导体锥形斜率 13° .若内外导体锥形位置相同,得到的回波损耗在高频范围不是很理想,通过对锥形过渡段内导体进行微小移位产生小电感对阶梯电容进行补偿,如图 5(a),采用软件不断优化设计得到当内导体与外导体内部对应位置错开 1.00 mm 距离时,得到的回波损耗(RL) < -32 dB,如图 5(b).



(a) 经过位移补偿后外导体内部与内导体错位轮廓图



(b) 不同方案下测试装置的回波损耗

图 5 锥形连接器位移补偿前后比较

Figure 5 Comparison of two different tapering connectors

1.3 支撑介质的设计与补偿

同轴线经过位置优化后,为支撑和固定同轴测试装置,需使用支撑介质.常用的支撑介质材料有聚四氟乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯等,笔者采用聚苯乙烯($\epsilon_r=2.5$),因其具有足够的硬度支撑较大尺寸的同轴线.

为了保证加入支撑介质段后测试装置在所需的频带范围内反射很小,沿同轴传输方向的要有一致的时域阻抗.在放入支撑介质的位置,支撑介质的半径满足:

$$Z_0 = (\eta_0 / 2\pi \sqrt{\epsilon_r} \ln(r_2 / r_1)) \quad (5)$$

由式(5)知,安装 50Ω 的聚苯乙烯介质支撑处的外导体内直径与内导体直径比值为 3.75 (大于 2.3). 因此需要将外导体内径与内导体设计成槽状,以保证每个截面的特性阻抗匹配,由

它们的比值可得到不同的外导体内径槽深度与内导体槽深度组合.当内导体槽深为零时,外导体槽为 h_0 (图 6a) 时,为使导体槽引起的不连续电容最小,通过不断优化仿真,得到当外导体槽深 h 约为 h_0 的 25% 时 (图 6b),将引起最小的回波损耗,如图 8. 通过计算得到:

$$r'_1 = 6.23 \text{ mm}$$

$$r'_2 = 23.36 \text{ mm}$$

$$a'_1 = 1.08 \text{ mm}$$

$$a'_2 = 4.05 \text{ mm}$$

经过同轴线槽深比值的选取,使得剩余反射大大减小.在支撑介质端面不连续所引起的电容,通过在断面挖去一定厚度的介质形成补偿电感,如图 7(a).

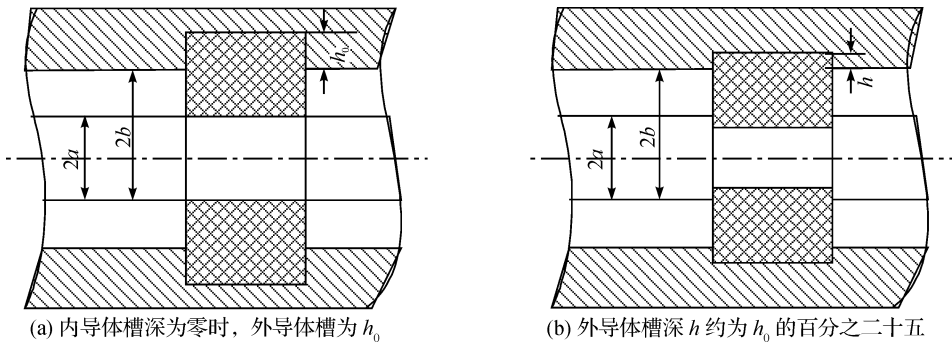


图 6 支撑介质的两种槽深形式

Figure 6 Different slot depths of brace medium

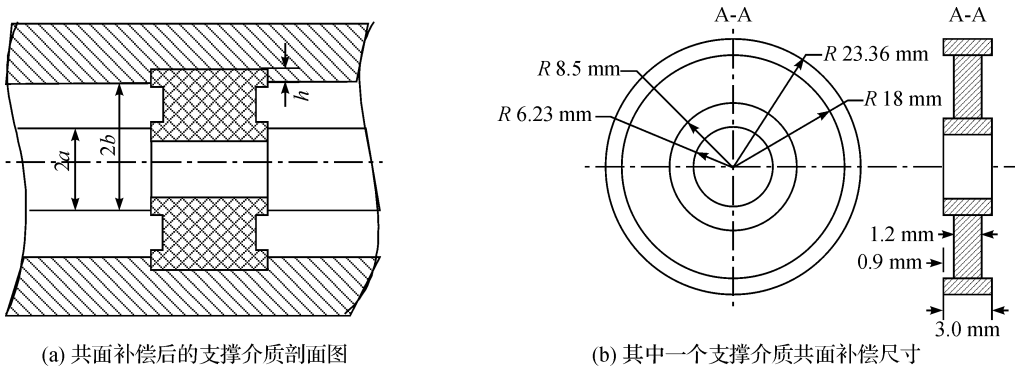


图 7 支撑介质共面补偿

Figure 7 Coplanar compensation of brace medium

环凹槽深度挖去量多少,在工程中很难计算,需要根据设计师的经验才能判断,但是通过仿真

优化,可以较快找到最佳位置,(图 7b),获得最小回波损耗($RL < -34 \text{ dB}$),如图 8.

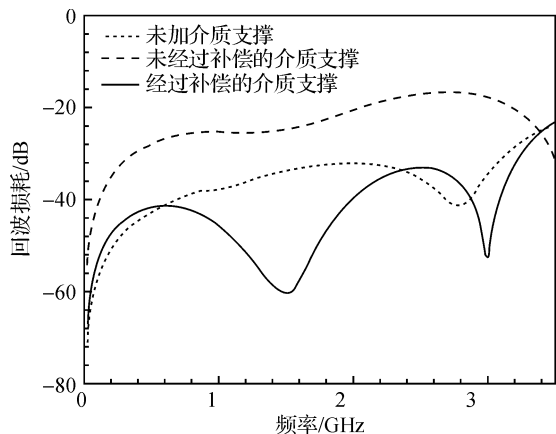


图8 不同支撑介质形式下的回波损耗

Figure 8 Return losses of coaxial tester with different kinds of brace medium

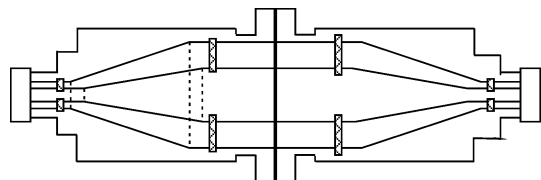


图9 经过补偿后的同轴测试装置截面图

Figure 9 Schetch of coaxial tester after compensation

2 屏蔽材料 SE 测试

得到最佳测试装置尺寸后,选择表面电阻为 $5\ \Omega$ 的单层镀膜屏蔽材料对图9的装置模型进行验证.如图10,未经过优化的模型所测得屏蔽材料的屏蔽效能 SE 波动非常大,而经过补偿之后的模型测得 SE 曲线较为平坦,符合 ASTM D4935 中的对于表面电阻为 $5\ \Omega$ 的屏蔽材料 SE 需满足 $-32\pm 3\ \text{dB}$ 的规定.此外,SE 与单层涂层屏蔽材料表面电阻 R_A 之间有一个简化公式^[6]:

$$SE = 20 \log \left| \frac{2R_A \eta_0}{(2R_A \eta_0 + \eta_0^2)} \right| \quad (9)$$

代入数值,可得到 $SE = -31.8\ \text{dB}$,这也验证了该设计符合理论要求.

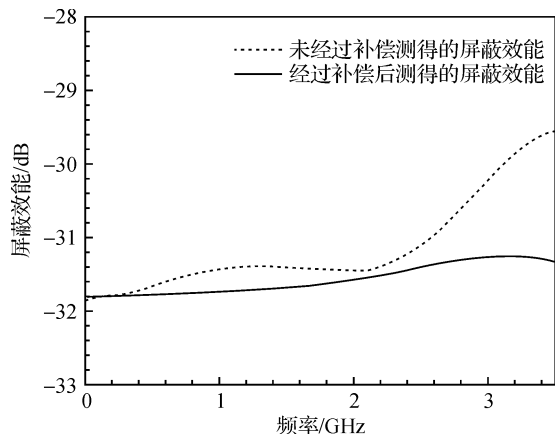


图10 屏蔽材料屏蔽效能值

Figure 10 Shielding effectiveness of shielding material

3 结 语

同轴测试装置中,截面突变处传输信号的反射非常大,虽然在实际运用中无法完全消除反射,使得时域阻抗达到完全精确匹配;但是,通过锥形过渡段位置,以及加入支撑介质后导体槽深与介质凹环深度的优化选择,确实能补偿阶梯电容,从而使反射达到最小.最后,用表面电阻为 $5\ \Omega$ 的屏蔽材料对该装置进行验证,结果满足要求.

【参 考 文 献】

- [1] 程明军,吴英雄,张宁,等.抗电磁辐射织物屏蔽效能的测试方法[J].印染,2003,29(9):31-35.
- [2] SCHULZ R B, PLANTZ V C, BRUSH D R, et al. Shielding theory and practice[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988,30(3):187-201.
- [3] ASTM Standard Designation D 4935-99. Standard test method for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of planar materials[S]. America: American Society for Testing and Materials, 1999.
- [4] POZAR D M. 微波工程[M]. 3版. 张肇仪,译.北京:电子工业出版社,2006:78-109.
- [5] SOMLO P I. The computation of coaxial line step capacitances[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1967,15(1):48-53.
- [6] VASQUEZ H, ESPINOZA L. Simple device for electromagnetic interference shielding effectiveness measurement [J]. EMC IEEE EMC Society Newsletter,2009(220):62-68.