

同轴线缆 PTFE 编织绝缘层介电常数 测量与验证

王亚亚¹ 胡吉永^{1,2} 孟粉叶³

1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620;
2. 安徽恒益智能科技股份有限公司, 安徽 阜阳 236500;
3. 嘉兴职业技术学院 时尚设计学院, 浙江 嘉兴 314036

摘要:采用孔隙率等效原则建立一种聚四氟乙烯(PTFE)编织绝缘层介电常数测量方法,以优化柔性同轴线缆的结构设计。试验先采用12锭的PTFE编织绝缘层作为研究对象,测得其孔隙率为5.593%;随后制备孔隙率相近(5.307%)的PTFE平纹织物,通过高品质因子(Q)谐振腔法测试PTFE平纹织物的介电性能,获得介电常数为1.438、介电损耗角正切为 9.612×10^{-3} 等关键参数;最后,基于这些参数,设计5种不同内导体根数的 $50\ \Omega$ 特性阻抗同轴线缆,并采用矢量网络分析仪进行阻抗特性测试。结果显示,5种线缆阻抗实测值与依托等效介电参数求解的理论值,均满足 $(50 \pm 2)\ \Omega$ 的设计要求。研究表明,基于孔隙率等效方法测得的介电常数可用于编织绝缘同轴线缆特性阻抗理论值的计算,以及同轴线缆的结构设计与优化。

关键词:射频编织同轴线缆;介电常数;平纹织物;编织物;特性阻抗

中图分类号:TS106

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2026)07-0010-08

Measurement and verification of dielectric constant of PTFE braided insulation layer in coaxial cables

Wang Yaya¹, Hu Jiyong^{1,2}, Meng Fenyue³

1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. Anhui Hengyi Intelligent Technology Co., Ltd., Fuyang 236500, Anhui, China;
3. School of Fashion Design, Jiaxing Vocational and Technical College, Jiaxing 314036, Zhejiang, China

Abstract: A measurement method for the dielectric constant of polytetrafluoroethylene (PTFE) braided insulation was established based on the porosity equivalence principle to optimize the structural design of flexible coaxial cables. Firstly, a 12-spindle PTFE braided insulation layer was selected as the research object, and its porosity was measured to be 5.593%. Subsequently, a PTFE plain woven fabric with a similar porosity (5.307%) was prepared. The dielectric properties of PTFE plain woven fabrics were tested using the high quality factor (Q) resonant cavity method, and key parameters including a dielectric constant of 1.438 and a dielectric loss tangent of 9.612×10^{-3} , were obtained. Finally, five types of $50\ \Omega$ characteristic impedance coaxial cables with

基金项目:上海市自然科学基金(22ZR1400800);安徽省制造业重点领域技术攻关项目(JB22053)

收稿日期:2025-09-18

作者简介:王亚亚,女,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为智能纺织品,2262928010@qq.com

通信作者:胡吉永,教授,主要研究方向为智能纺织品,hujy@dhru.edu.cn

different numbers of inner conductor strands were designed based on these parameters, and their impedance characteristics were tested using a vector network analyzer. The results indicated that all the measured impedance values of the five cables and the theoretical values calculated using the equivalent dielectric parameters satisfied the design requirement of $(50 \pm 2) \Omega$. It is demonstrated that the dielectric constant measured based on the porosity equivalence method can be utilized for the calculation of the theoretical characteristic impedance of braided insulation coaxial cables and for the structural design and optimization of coaxial cables.

Keywords: radio frequency braided coaxial cable; dielectric constant; plain weave fabric; braided fabric; characteristic impedance

在可穿戴设备^[1]、柔性天线^[2]及电路等领域,同轴电缆可用于高频信号的传输,以及设备之间的互联^[3]。应用过程中,同轴电缆需承受反复的弯曲、拉伸和扭转。传统同轴电缆由内导体、绝缘层、屏蔽层及护套等组成^[4]。其中,传统挤出/注塑绝缘层因机械疲劳而易开裂^[5]。聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, PTFE) 具有优异的绝缘性、耐高温性及耐化学腐蚀性,其绝缘电阻极高、介电常数小、介电损耗低,满足高速数据传输或射频应用中同轴传输线需降低介电常数以缩短信号延迟和减少损耗的需求^[6],且其编织结构具有更好的柔韧性和耐久性。因此,本研究将 12 股 PTFE 长丝纱编织物用于同轴电缆的绝缘层,但其等效介电常数表征不同于传统 PTFE 均质材料。因此,为确保 50Ω 的特性阻抗设计,需精确测量其介电常数。

目前,国内外标准仅规定了单一均匀绝缘介质的介电性能测试方法^[7],尚未涉及编织结构绝缘层介电性能的测试。传统谐振腔法^[8]或自由空间法^[9]在应用于结构复杂且各向异性显著的编织绝缘层时存在局限性,如测试样制备困难,或对测试面平整度要求高等。2 类经典的有效介质模型——Maxwell-Garnett 模型和 Bruggeman 模型已广泛应用于关联多孔材料的介电性能与微观结构,岩石物理^[10]和聚合物多孔膜^[11]等领域也已证实孔隙率是等效介电常数的关键主导因素。因此,本研究提出基于孔隙率等效原则的介电常数表征方法,即通过制备与绝缘层用 PTFE 编织物孔隙率等同的 PTFE 平纹织物,测量其介电参数,进而推导出 PTFE 编织物的等效介电常数,然后据此设计了 5 种内导体结构的 50Ω 同轴电缆,并以 RG-174 标准同轴电缆为对照样,通过传输相位差法验证等效介电常数用于

线缆阻抗匹配设计的可靠性,以期为编织柔性同轴电缆的阻抗匹配设计提供有效参考。

1 孔隙率等效测试原理

编织管状物介电常数难以直接测量。本研究基于有效介质理论提出一项基本假设,即 2 种多孔材料即使微观结构存在差异,但若两者孔隙率相同,则两者宏观介电常数可视为等效。该假设认为,在相同的孔隙率条件下,不同微观结构的材料在宏观电磁响应上具有可类比性。

因此,基于孔隙率等效原则的多孔材料介电常数表征方法^[12],本研究选取孔隙率相同但编织方式不同的 PTFE 平纹织物和编织角为 45° 的 PTFE 编织物作为研究对象,通过构建孔隙率等效介电常数模型,完成 2 类织物间介电常数等效换算,并通过测试验证模型的准确性。

已有研究表明,低孔隙率 ($<10\%$) 条件下,孔隙率是决定材料介电性能的主要因素^[13]。平纹织物与编织物孔隙形貌不同,故本研究采用经形状因子修正的 Maxwell-Garnett 模型进行介电常数的表征^[14]。该模型引入退极化因子 (L) 定量描述非球形孔隙的几何特征^[15],并建立了介电常数与孔隙率、退极化因子的函数关系式:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_0 \left[1 + \frac{p(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0 + L(1-p)(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)} \right] \quad (1)$$

式中: ε_{eff} 为 PTFE 织物的有效介电常数; ε_0 为实体基材即 PTFE 长丝纱的介电常数; p 为织物的孔隙率,%; ε_{air} 为空气介电常数,数值取 1。

若要求 PTFE 平纹织物与 PTFE 编织物的介电常数相等,则需满足:

$$\frac{p_{\text{平纹织物}}(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0 + L_{\text{平纹织物}}(1 - p_{\text{平纹织物}})(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)} = \frac{p_{\text{编织物}}(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0 + L_{\text{编织物}}(1 - p_{\text{编织物}})(\varepsilon_{\text{air}} - \varepsilon_0)} \quad (2)$$

化简后得:

$$\frac{p_{\text{平纹织物}}}{1 + L_{\text{平纹织物}} \left[\frac{(1 - p_{\text{平纹织物}})(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0} \right]} = \frac{p_{\text{编织物}}}{1 + L_{\text{编织物}} \left[\frac{(1 - p_{\text{编织物}})(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0} \right]} \quad (3)$$

式(3)中,2种织物的孔隙率($p_{\text{平纹织物}}$ 与 $p_{\text{编织物}}$)可通过后续试验测得; L 是影响电场中极化响应衰减程度的无量纲参数,其数值与孔隙形状密切相关。

2 试验

2.1 原材料

PTFE 长丝纱(型号 TSM-608,线密度 44.44 tex,东莞市特斯曼特种绳索有限公司);纯铜丝(直径 0.095 mm,梓芯科技);镀银纱线(由浸润银离子的锦纶制备,线密度 7.78 tex,大志远防辐射面料商行);标准同轴线缆(型号 RG-174,浩海兴天线)。

2.2 同轴线缆的制备及 PTFE 编织物孔隙率的表征

采用 12 锭立式编织机加工同轴线缆。同轴线缆的 3 层结构及其编织示意图 1。

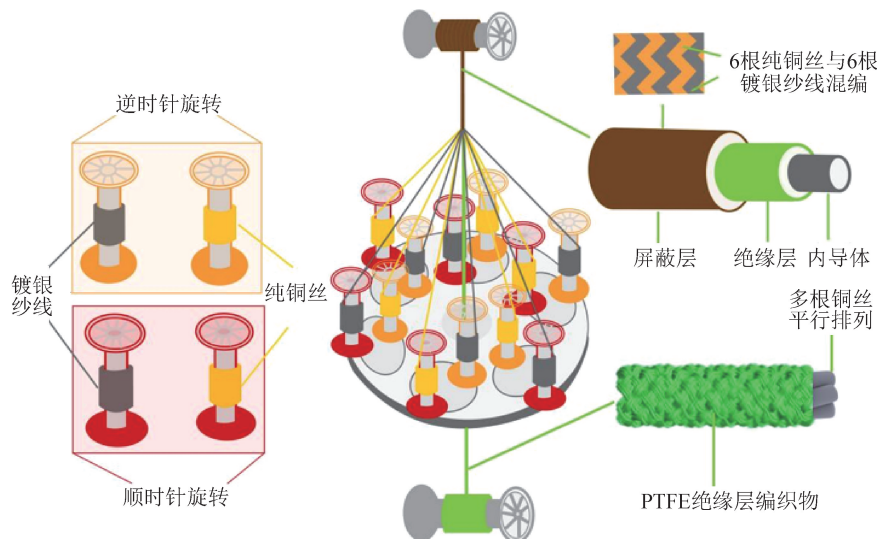


图 1 同轴线缆各层结构与编织示意

Fig. 1 Each layer structure of coaxial cable and schematic of braid

同轴线缆内导体采用多股平行的铜丝结构。制备的同轴线缆的规格采用内导体结构“ $n \times 0.095$ ”表示,其中: n 指纯铜丝根数,本研究为 8~12 根;0.095 指纯铜丝直径,单位 mm。梯度配置导体根数可实现内导体截面积连续可调。这种设计能在抑制高频趋肤损耗的同时优化柔韧性,还能通过调控内外导体直径验证等效介电常数模型。本研究将基于制备的 5 种规格的同轴线缆特性阻抗理论值与实测值,探究所提出的介电常数等效方法的可行性。绝缘层为 45°编织角的 PTFE 编织物,由 12 根线密度相同的 PTFE 长丝纱交错编织而成,具有平纹等效结构,其工艺参数可确保 PTFE 编织物与 PTFE 平纹织物

具有可比性。屏蔽层由 6 根线密度 7.78 tex 的镀银纱线与 6 根直径 0.095 mm 的纯铜丝,以 $(54.11 \pm 4.01)^\circ$ 的编织角编织而成,既利用了银的优良导电性,实现了宽频段电磁屏蔽性能的优化,又借助了铜丝的力学强度,提升了整体结构的稳定性。屏蔽层的复合结构能在保持线缆弯曲柔韧的基础上,显著增强其抗电磁干扰的能力,延长线缆使用寿命。

圆管状的编织物表面存在曲率,其管壁孔隙三维形貌表征较难。时子祥等^[16]基于火棉胶固化-平面展开法提出了一种二维等效表征策略,即先使用热固化型火棉胶均匀涂覆于编织管外表面,经 3~5 min 的常温固化后得到非收缩性支撑

层,然后沿管体轴向精密剖切,展开得到平面结构的编织层。本研究在其研究方法的基础上结合 ImageJ 图像分析技术无损测定 PTFE 编织物的孔隙率(图 2),发现制备的 PTFE 编织物的孔隙率为 5.593%。

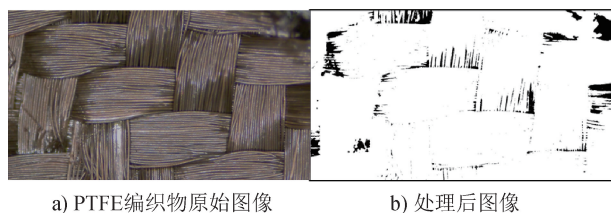


图 2 PTFE 编织物孔隙率的测定
Fig. 2 Determination of porosity of PTFE braided fabric

2.3 PTFE 平纹织物的制备及其孔隙率的表征

以 44.44 tex 的 PTFE 长丝纱为经纬纱,采用 TNJ101E-12-4B 型全自动剑杆小样织机制备 PTFE 平纹织物。为使 PTFE 编织物和 PTFE 平纹织物孔隙率等同,确定 PTFE 平纹织物的覆盖系数为 94.407%。利用式(4)~式(6)计算经向密度:

$$E_z = E_j + E_w - E_j \times E_w \quad (4)$$

$$E_w = P_w \times d_w \quad (5)$$

$$E_j = P_j \times d_j \quad (6)$$

式中: E_z 为织物总覆盖系数,%; E_j 、 E_w 为经、纬纱覆盖系数,%; d_j 、 d_w 为经、纬纱的直径,皆为 0.30 mm; P_j 、 P_w 为经、纬向密度,其中纬向密度设定为 190 根/(10 cm)。

经计算得到经向密度为 290 根/(10 cm)。接着,基于确定的经、纬向密度,采用 79 齿/(10 cm)的钢筘制备 PTFE 平纹织物,上机幅宽为 14.28 cm。下机后经实测,经向密度为(296±3)根/(10 cm),织缩率为 2.06%。图 3 为 PTFE 平纹织物的上机图。

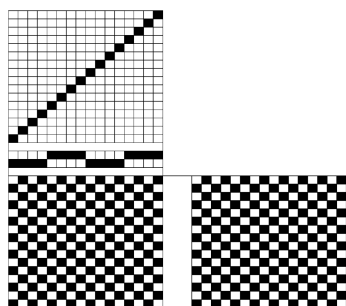


图 3 PTFE 平纹织物上机图(顺穿法)
Fig. 3 Looming draft of PTFE plain weave fabric (straight drafting)

平铺 PTFE 平纹织物[图 4a)],利用 ImageJ 图像分析技术得到图 4b)所示的图像,其中白色为纱线覆盖区域、黑色为纱线未覆盖区域。经计算,PTFE 平纹织物的孔隙率为 5.307%,与设计值(5.593%)偏差 0.286%,这源于编织过程中长丝直径形变导致的覆盖系数变化。

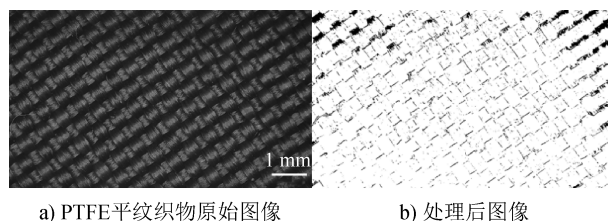


图 4 PTFE 平纹织物孔隙率的测定
Fig. 4 Determination of porosity of PTFE plain weave fabric

另显微分析表明,平纹织物孔隙呈四边形,编织物孔隙呈取向性拉长状态。故引入 L 改进等效介电常数模型,其中 $L_{\text{平纹织物}}$ 约为 0.2、 $L_{\text{编织物}}$ 约为 0.3,以有效表征异形孔隙的特征。

2.4 高品质因子(Q)谐振腔法表征 PTFE 平纹织物介电参数

依据 GB/T 3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》标准,使用 YG141D-Ⅱ型织物厚度仪,测试不同层数 PTFE 平纹织物的厚度,用于微扰理论模型中介电常数的计算。

参照 IEC 61338-1 *Waveguide type dielectric resonators - part 1: general information and test conditions* (《波导型介电谐振器-第 1 部分:一般信息和试验条件》)标准,采用微波频率计(Microwave Frequency Q-Meter) Type3 测试 PTFE 平纹织物的介电参数。测试过程中,利用多层试样替代单层试样,以提高测量精度,同时严格控制厚度、温湿度等变量,确保数据可靠。测试示意如图 5 所示。

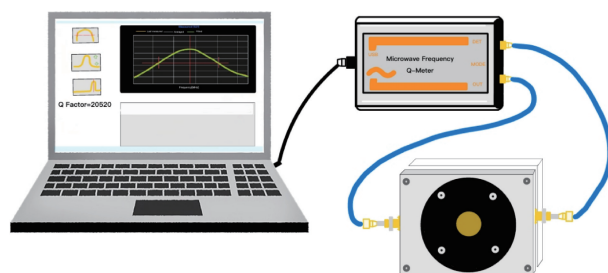


图 5 高 Q 谐振腔法表征介电参数
Fig. 5 Characterization of dielectric parameters using high- Q resonant cavity method

2.5 同轴电缆特性阻抗测试

2.5.1 电容

参照 GB/T 17737.103—2018《同轴通信电缆 第 1-103 部分:电气试验方法 电缆的电容试验》标

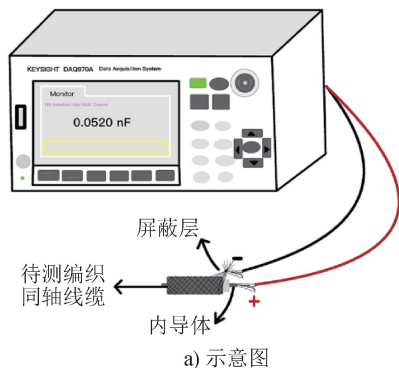


图 6 同轴电缆电容测试

Fig. 6 Capacitance test of coaxial cable

2.5.2 插入相位

参照 GJB 973B—2021《柔软和半硬射频电缆通用规范》标准,采用如图 7 所示的 E5071C 双端口矢

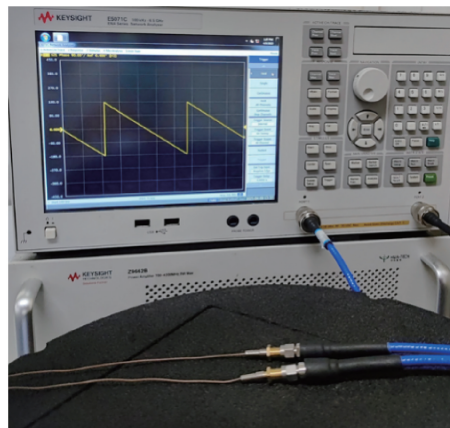
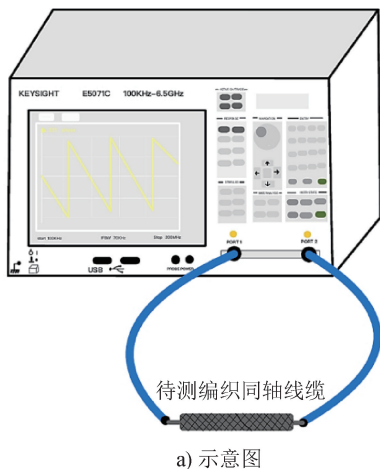


图 7 同轴电缆插入相位测试

Fig. 7 Insertion phase test of coaxial cable

2.5.3 特性阻抗

采用传输相位差法,基于相位变化对应的频率变化与线缆总电容之间的耦合关系,计算得到同轴电缆的特性阻抗实测值(Z_c):

$$Z_c = \frac{10^6}{\Delta f C_{\text{总}}} \quad (7)$$

式中: Δf 为 200 MHz 频率附近,试样相位变化 360° 所对应的频率变化,MHz; $C_{\text{总}}$ 为长度为 l 的线缆试样总电容,pF。

准,利用 DAQ970A 数据采集系统,按图 6 的方式连接测试样(红色导线连接同轴电缆内导体、黑色导线连接同轴电缆屏蔽层),测量同轴电缆内外导体间的电容。

量网络分析仪(是德科技,100 kHz~6.5 GHz)进行 RG-174 标准同轴电缆及 5 种规格同轴电缆的插入相位测试。

3 结果与讨论

3.1 PTFE 平纹织物介电常数测试结果

测得 2~4 层叠加 PTFE 平纹织物试样的介电参数如表 1 所示。

从表 1 可以看出:随着叠加层数的增加,PTFE 平纹织物的介电常数呈递增趋势,这可归因于多层结构显著增加了有效极化分子数量,增强了材料在

表 1 不同叠加层数的 PTFE 平纹织物的介电参数

Tab. 1 Dielectric parameters of PTFE plain weave fabrics with different stacking layers

叠加层数	多层织物厚度/mm	介电参数		
		Q	介电常数(ε_r)	损耗角正切($\tan \delta$)
2	0.727 3	14 822.4±1 259.6	1.431±0.016	9.346×10^{-3}
3	1.138 5	13 083.4±672.6	1.436±0.014	8.580×10^{-3}
4	1.507 6	10 384.2±680.8	1.447±0.014	1.091×10^{-2}

电场作用下的极化响应;不同叠加层数的织物,其介电常数的波动都在 1.12%以内,表明多层试样介电性能稳定;层数增加,引入的空气间隙和界面增多,界面极化和局部放电效应加剧,材料损耗角正切值增加。

表 2 对 Joshi 等^[17]采用贴片天线法与环形谐振器法测得的 PTFE 纱线介电参数,以及本研究高 Q 谐振腔法测得的 PTFE 平纹织物介电参数进行了归纳,其中高 Q 谐振腔法相应介电参数为表 1 中多层织物测试数据的算术平均值。

表 2 3 种方法测得试样的介电参数对比

Tab. 2 Comparison of dielectric parameters measured by three different methods for test samples

测试方法	测试样品	ε_r	$\tan \delta$
贴片天线法	PTFE 纱线	2.100	1.000×10^{-2}
环形谐振器法	PTFE 纱线	2.200	1.000×10^{-2}
高 Q 谐振腔法	PTFE 平纹织物	1.438	9.612×10^{-3}

由表 2 的数据可知,PTFE 纱线介电常数明显高于 PTFE 平纹织物,二者微观孔隙结构存在本质区别;贴片天线法和环形谐振器法仅能表征纯 PTFE 纱线的本征特性,无法反映具有孔隙结构的编织绝缘层整体介电行为。本研究采用多层试样取算术平均值的方法,可为绝缘层 PTFE 编织物介电表征提供可靠参数,得到的 PTFE 平纹织物介电常数为 1.438。

3.2 等效介电常数的验证

3.2.1 同轴电缆特性阻抗理论值

基于孔隙率等效原则,将测试得到的 PTFE 平

纹织物的介电常数用于同轴电缆特性阻抗理论值(Z_0)的计算:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon_r}} \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) \quad (8)$$

式中: ε_r 为绝缘层 PTFE 编织物的介电常数,取 1.438; D 表示外导体的内径,mm; d 表示内导体的外径,mm。

5 种规格的同轴电缆的特性阻抗理论值如表 3 所示,可以看出,其结果均严格满足 $(50 \pm 2) \Omega$ 的国际标准要求。

表 3 5 种规格同轴电缆的直径参数与特性阻抗理论值

Tab. 3 Diameter parameters and theoretical characteristic impedance values of five types of coaxial cables

项目	同轴电缆规格				
	8×0.095	9×0.095	10×0.095	11×0.095	12×0.095
D/mm	0.950	0.962	0.982	0.992	1.028
d/mm	0.346	0.358	0.368	0.378	0.392
Z_0/Ω	50.480	49.403	49.054	48.221	48.185

3.2.2 同轴电缆特性阻抗实测值

为进一步验证孔隙率等效原则的可靠性,采用传输相位差法对 RG-174 标准同轴电缆与 5 种规格的同轴电缆试样进行特性阻抗测试。

测得 RG-174 标准同轴电缆与 5 种规格同轴电缆的单位长度电容见表 4。其中, RG-174 标准同轴电缆为对照样本,其数据用于验证本电容测试方法的准确性。

表 4 RG-174 标准同轴电缆及 5 种规格同轴电缆的单位长度电容

Tab. 4 Capacitance per unit length of RG-174 standard coaxial cable and five types of coaxial cables

项目	同轴电缆规格					
	RG-174	8×0.095	9×0.095	10×0.095	11×0.095	12×0.095
l/m	2.00	2.08	2.08	2.03	2.01	2.01
$C_{\text{总}}/\text{pF}$	195.690±0.010	213.824±0.026	216.491±0.019	215.586±0.014	218.025±0.025	217.132±0.018
单位长度电容/ $(\text{pF} \cdot \text{m}^{-1})$	97.85	102.80	104.08	106.20	108.47	108.03

从表 4 可以看出, RG-174 标准同轴电缆的单位长度电容为 97.85 pF/m, 与其标称值 (100 ± 5) pF/m 高度吻合, 说明本电容测试方法准确、可靠; 本研究制备的不同规格的同轴电缆, 内导体直径与单位长度电容整体呈正相关性, 直径增大不仅增加了等效极板面积, 提升了电容, 还优化了电场分布, 减小了边缘场畸变, 使 PTFE 编织物绝缘层介电性能得到更充分的体现。

在 0~200 MHz 的频率范围内, 对 RG-174 标准同轴电缆及本研究制备的 5 种规格同轴电缆的插入相位进行系统测试, 结果见图 8。表 5 对 RG-174 标准同轴电缆及 5 种规格同轴电缆相位变化 360° 所对应的第 1 频率变化点 (f_1)、第 2 频率变化点 (f_2) 及其差值 Δf 进行了归纳, 并结合表 3 中的 $C_{\text{总}}$ 和式 (7) 得出特性阻抗实测值 (Z_c)。

表 5 RG-174 标准同轴电缆及 5 种规格同轴电缆在 0~200 MHz 内的频率变化点及其差值

Tab. 5 Frequency variation points and their differences for the RG-174 standard coaxial cable and five types of coaxial cables within 0~200 MHz

项目	同轴电缆规格					
	RG-174	8×0.095	9×0.095	10×0.095	11×0.095	12×0.095
f_1/MHz	50.392	46.209	43.922	46.209	45.828	45.447
f_2/MHz	150.723	138.808	134.835	140.332	138.808	140.332
$\Delta f/\text{MHz}$	100.331	92.599	90.913	94.123	92.980	94.885
Z_c/Ω	50.932	50.505	50.808	49.281	49.329	48.537

由表 5 可知, 2.00 m 长的 RG-174 标准同轴电缆的特性阻抗实测值为 50.932 Ω , 其标准值为 (50 ± 2) Ω , 说明传输相位法测试同轴电缆的特性阻抗具有一定的准确性。图 9 将本研究制备的 5 种规格的同轴电缆特性阻抗理论值和实测值进行了比较。

从图 9 可以看出, 不同规格同轴电缆特性阻抗的理论值与实测值高度吻合, 整体均落在 (50 ± 2) Ω 范围内。该结果既证实了基于孔隙率等效原则表征介电常数方法的可靠性, 也验证了传输相位差法在编织结构同轴电缆特性阻抗测试中的适用性。其中, “9×0.095” 规格的同轴电缆其特性阻抗理论值与实测值偏差最大, 差值为 1.102 Ω , 对应相对偏差为 2.182%, 但仍处于线缆加工公差范围内, 偏差原因主要来自两方面: 一是内导体直径的机械加工公差, 二是绝缘层编织工艺带来的孔隙率不均匀性。两方面因素都会造成绝缘层等效介电常数小幅波动, 进而改变电磁场分布, 最终体现为特性阻抗实测

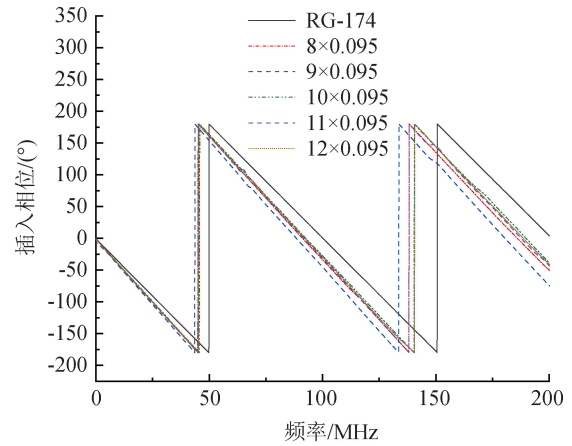


图 8 RG-174 标准同轴电缆及 5 种规格同轴电缆插入相位随频率变化的曲线

Fig. 8 Curves of insertion phase varying with frequency for the RG-174 standard coaxial cable and five types of coaxial cables

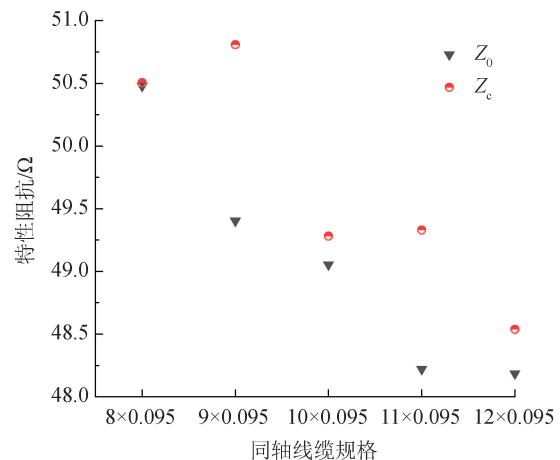


图 9 不同规格同轴电缆特性阻抗理论值与实测值

Fig. 9 Theoretical and measured characteristic impedance values of coaxial cables with different specifications

值和理论值产生小幅偏离。

研究结果可为柔性同轴电缆的阻抗匹配设计提供重要参考。

4 结论

本研究建立了基于孔隙率等效的 PTFE 编织绝缘层介电常数测量方法,并通过多组试验验证了该方法的可靠性,主要结论如下:

(1)以编织绝缘层为参照样本,PTFE 平纹织物的孔隙率(5.307%)与编织绝缘层的孔隙率(5.593%)偏差仅为 0.286%,说明孔隙率等效思路可精准匹配 2 种织物的孔隙结构,用于表征编织绝缘层等效介电性能。

(2)通过高 Q 谐振腔法测试确定,相同孔隙率的 PTFE 平纹织物的介电常数为 1.438,介电损耗角正切为 9.612×10^{-3} 。将这些参数应用于基于孔隙率等效介电常数开展的 50Ω 柔性编织绝缘同轴线缆结构设计,发现所有样品的实测阻抗均满足 $(50 \pm 2) \Omega$ 的设计要求,最大相对偏差小于 2.2%,且实测值与理论值高度吻合,这进一步验证了孔隙率等效介电测试方法与配套线缆阻抗计算体系的准确性。

综上,本研究提出的孔隙率等效方法可有效获取编织绝缘层介电参数,且依托该参数建立的线缆阻抗设计流程可靠、有效,能够为编织绝缘柔性同轴线缆的结构优化与阻抗匹配设计提供试验支撑。但本研究的局限在于等效模型未考虑 PTFE 编织材料介电各向异性,后续可结合电磁仿真方法分析织物不同方向介电响应规律,进一步完善该等效测试方法的理论模型,扩大工程适用范围。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 刘思浩, 晋艺, 付毅, 等. 面向北斗卫星通信的柔性窄带织物天线设计[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(7): 8-14.
- [2] 晋艺, 刘思浩, 杨旭东, 等. 1.37 GHz 织物微带贴片天线的设计与制备[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(7): 1-7.
- [3] 赵佳文, 张湿涵, 孟粉叶, 等. 柔性纺织传输线的制备和性能评价[J]. 现代纺织技术, 2025, 33(10): 105-114.
- [4] Huang S Y, Liu Y, Zhao Y, et al. Flexible electronics: stretchable electrodes and their future[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(6): 1805924.
- [5] 谢建国, 蓝宗长. 地下(水下)电缆接头防水密封性能研究及应用[J]. 智能建筑电气技术, 2024, 18(5): 114-118.
- [6] 陈思远. 同轴电缆材料绝缘性能与耐压失效分析[J]. 通讯世界, 2024, 31(12): 160-162.
- [7] 殷海成, 童攀, 丁亚茜, 等. 同轴通信电缆等效介电性能的测试方法[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2022(1): 1-4.
- [8] Chen L F. Microwave electronics: measurement and materials characterization[M]. Chichester: John Wiley, 2004.
- [9] Ghodgaonkar D K, Varadan V V, Varadan V K. A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(3): 789-793.
- [10] Santamarina J C, Klein A, Fam M A. Soils and waves: particulate materials behavior, characterization and process monitoring[J]. Journal of Soils and Sediments, 2001, 1(2): 130.
- [11] Kim Y S, Wang F. Effective dielectric constant of microporous polyethylene membranes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(19): 4126-4132.
- [12] 马姣姣, 刘培奇, 郭贝贝, 等. 高孔隙率聚酰亚胺微孔膜的制备及其介电性能[J]. 绝缘材料, 2024, 57(10): 34-41.
- [13] Li M L, Sun Q, Fan W J, et al. A bis-stabilized interface strategy for low- k benzocyclobutene-based hollow silica nanocomposites[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(5): 3698-3706.
- [14] Maxwell Garnett J C. Colours in metal glasses and in metallic films[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1904, 73(488): 443-445.
- [15] Chitanvis S M, Shvets G. Optical properties of photonic metamaterials: a review[J]. Journal of Optics, 2009, 11(7): 075001.
- [16] 时子祥, 孟粉叶, 杨旭东, 等. 编织参数对双层编织管孔隙率的影响[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(2): 24-29.
- [17] Joshi R, Podilchak S K, Constantinides C, et al. Flexible textile-based coaxial transmission lines for wearable applications[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(2): 665-675.