

火工药剂介电常数测试技术及响应分析

赵团¹, 宋明军², 纪向飞¹, 赵甲¹

(1. 陕西应用物理化学研究所 瞬态化学效应与控制全国重点实验室, 西安 710061;
2. 中国航天科工集团第六研究院二一〇研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 分析测量不同频率下的火工药剂的介电常数, 衡量火工药剂电磁波响应敏感程度。**方法** 利用电磁波同轴传输技术, 设计与研制介电常数测试用夹具、介电常数测试用反演算法及 APP, 通过测量火工药剂反射系数, 对火工药剂复介电常数进行反演, 可测量火工药剂在 1~18 GHz 微波频段的复介电常数。**结果** 测量分析了火工药剂 HY-5 黑火药的复介电常数, 得到了其 1~18 GHz 频率范围内的响应特性, 黑火药介电常数实部的变化范围为 1.0~5.0, 在 4.52 GHz, 出现最大值 4.91。**结论** 火工药剂从微波辐射场中吸收的能量正比于其自身的介电常数, 火工药剂介电常数越大, 其从微波辐射场中吸收的能量越大。在微波谐振点, 火工药剂在运输、储存时需进行一定的安全防护。

关键词: 火工药剂; 介电常数; 测试夹具; 反演; 响应特性; 防护

中图分类号: TJ450 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)11-0019-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.003

Measurement Technology of Dielectric Constant of Initiating Explosive and Response Analysis

ZHAO Tuan¹, SONG Mingjun², JI Xiangfei¹, ZHAO Jia¹

(1. State Key Laboratory of Transient Chemical Effects and Control, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. Research Institute of 210, Sixth Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze and measure the dielectric constant of initiating explosives at different frequencies, so as to measure the sensitivity of electromagnetic wave response of initiating explosives. Using the coaxial electromagnetic wave transmission technology, the fixture for the test of dielectric constant, the inversion algorithm and APP for dielectric constant test were designed and developed, and the complex dielectric constants of initiating explosives were inverted by measuring the reflection coefficient, so as to measure the complex dielectric constant of initiating explosives in the microwave frequency band of 1-18GHz. The complex dielectric constants of initiating explosive of HY-5 black powder were measured and analyzed, and their response characteristics in the frequency range of 1-18 GHz were obtained. The variation range of the real part of the dielectric constant of black powder was from 1.0 to 5.0, and a maximum value of 4.91 appeared in 4.52 GHz. The energy absorbed from the microwave radiation field of initiating explosives is proportional to their own dielectric constant. The larger the dielec-

收稿日期: 2024-09-12; 修订日期: 2024-10-18

Received: 2024-09-12; Revised: 2024-10-18

基金项目: 重点实验室基金项目 (6142602220408)

Fund: Key Laboratory Foundation (6142602220408)

引文格式: 赵团, 宋明军, 纪向飞, 等. 国内外飞机缓蚀剂标准差异浅析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 19-24.

ZHAO Tuan, SONG Mingjun, JI Xiangfei, et al. Measurement Technology of Dielectric Constant of Initiating Explosive and Response Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 19-24.

tric constant of initiating explosives, the larger the energy absorbed from the microwave radiation field. At the microwave resonance point, the initiating explosives need to be transported and stored with a certain degree of safety protection.

KEY WORDS: initiating explosives; dielectric constant; testfixture; inversion; response characteristic; protection

介电特性是火工药剂的固有特性,由其自身的组成成分和配比关系决定。火工药剂的介电常数是描述火工药剂和电磁波电场相互作用的物理量,介电常数大小决定了在电磁波加热过程中微波的穿透深度和火工药剂吸收微波的能力,是影响电磁波加热效果最重要的参数。不同火工药剂的介电常数有着本质的区别^[1-2]。介电常数是电磁材料与电磁波相互作用的关键参数,它由介电实部和虚部组成,测量物体的介电性能需要明确它的实部和损耗角正切。复介电系数的定义:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + j\varepsilon'' = \varepsilon_0(\varepsilon_r' + j\varepsilon_r'') \quad (1)$$

式中: ε^* 表示物质的复介电系数; ε' 表示复介电系数的实部; ε'' 表示复介电系数的虚部; ε_0 表示自由空间的介电常数, $\varepsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$ F/m; ε_r' 表示相对复介电系数的实部; ε_r'' 表示相对复介电系数的虚部。其中,复介电系数的实部代表着介质对于电子的束缚能力,即介质的极化能力^[3-4];复介电系数的虚部代表着介质的损耗情况。通常也用损耗角正切来表示其损耗,其定义为相对复介电系数的虚部和实部之比:

$$\tan \sigma = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2)$$

当火工药剂介电常数大小不同时,火工药剂的升温效果不同,升温的速度不仅受到微波工作频率、场强大小的影响,而且和火工药剂自身的比热容、介电损耗也有关^[5]。当微波频率恒定时,被加热火工药剂的升温速率正比于外加电场场强的平方和其自身的介电损耗 ε'' 。

文中针对火工药剂介电常数,基于电磁波同轴传输技术,建立了火工药剂介电常数测试系统,测量了火工药剂 HY-5 黑火药在 1~18 GHz 微波频段的复介电常数,及其复介电常数的频变特性。测试得到了该火工药剂的微波谐振频点,为指导火工品的电磁防护、安全储存提供了技术支撑。

1 介电常数测试原理

常用的介电参数测量方法主要有谐振法和网络参数法。谐振法测量的主要原理是将待测物质放置于封闭或者半封闭的谐振腔电场或磁场的峰值处,通过测量放置前后谐振腔的品质因数 Q 和共振频率 f 的变化值,结合谐振腔和电磁参数的相关理论,推导出待测物质的介电特性^[6-7]。使用谐振法进行测量时,需要将待测材料放在电磁场最强的位置,因此对待测样品的尺寸需要远远小于谐振腔的体积,以避免对谐振

腔的电磁场分布造成影响。谐振法的缺点是只能进行点频测试,不能进行宽频带的介电测试^[8]。

网络参数法是将传感器和待测物质等效为一个一端口或两端口网络,再利用矢量网络分析仪等测试仪器,结合传输反射法、自由空间法、终端短路、终端开路法等电磁参数测量方法,得到待测物质的散射参数。再结合相关微波测试理论,就能推算出待测样品的介电特性^[9-10]。网络参数法能够满足物质在微波频段的连续扫频测试和宽频带测试,可以对不同特性的介电材料进行测量,系统搭建较为简单、对待测样品要求不高,测量结果较准确,能够进行自动化测试和宽频带测试,系统搭建便捷易于实施^[11]。

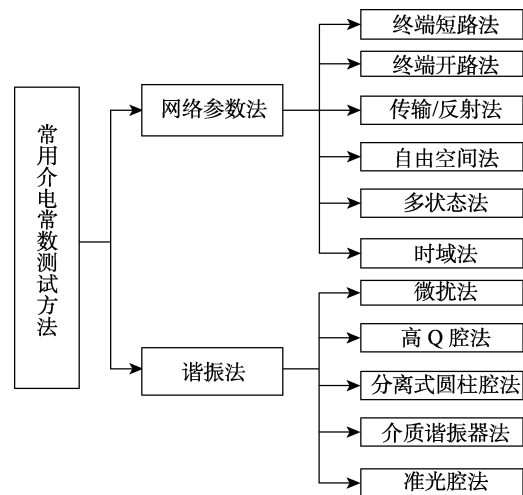


图1 介电参数测量方法

Fig.1 Measurement method of dielectric parameter

本文采用网络参数法中的传输反射法,传输反射法通过将待测物质放置于一个可以等效为互易两端口网络的传输线中,电磁波传送到传输线时,遇到待测物质后,一部分电磁波会穿过待测物发生透射,另一部分会发生反射,整个过程会伴随着电磁波相位的改变和能量的衰减^[12]。采用矢量网络分析仪可以测得放置待测物前后等效两端口网络的反射系数和透射系数,通过散射参数和介电特性之间的某种关系,可以反演出对应物质的介电特性^[13-15]。根据电磁场理论有以下关系:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{A}{B}} \quad (3)$$

$$A = -\left[\frac{c}{wd} \ln\left(\frac{1}{\tau}\right) \right]^2 \quad (4)$$

$$B = \left[\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right]^2 \quad (5)$$

$$\Gamma = K - \sqrt{K^2 - 1} \quad (6)$$

$$K = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (7)$$

式中: c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s; ω 为频率, Hz; Γ 为反射系数; d 为同轴待测物填充的厚度, m; τ 为弛豫时间, s。这些表达式给出了介电参数与 S_{11} (反射) 与 S_{21} (传输) 的定量关系, 即可以通过 S_{11} 和 S_{21} 得到 (ϵ, μ) 。

2 火工药剂介电常数测试

2.1 测试系统

火工药剂介电常数测试系统主要由矢量网络分析仪、宽频段同轴传感器、正演数据集、数据反演处理方法及程序等组成。介电常数测试系统设计与研制整体上需设计合适的宽频段同轴结构夹具, 利用该夹具, 通过测量已知介电常数的样品, 就可得到 S 参数与介电常数的正向对应关系, 用此结果形成正演数据集。对于待测火工药剂, 将待测火工药剂装填进同轴夹具, 利用矢量网络分析仪进行宽频段扫描得到待测样品的 S 参数, 再运用神经网络算法进行反演得到介电常数。

2.1.1 同轴结构夹具设计

根据火工药剂结构特点, 为了能测试 1~18 GHz 宽频段, 并且便于试验, 本项目设计了宽频段同轴夹具, 该夹具主要由内导体、外导体、绝缘介质、试验样品腔体组成。试验样品填充腔体设计的同轴内导体直径为 2.2 mm, 外导体直径为 7.32 mm, 两侧浅绿色为同轴线内外径中的绝缘介质为特氟龙, 并设计了转接到 3.5 mm 连接器的匹配结构, 保证同轴夹具的传输特征阻抗为 50 Ω , 实现同轴夹具与射频电缆阻抗的匹配性。机械结构采取断开处有螺纹的结构, 以方便填充火工药剂, 仿真结果设计如图 2 所示。

加工研制的同轴结构如图 3 所示, 该装置带有螺纹, 可从中间拆卸。将火工药剂逐步填充在设计好的

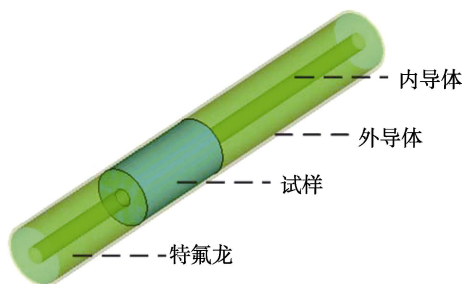


图 2 同轴夹具结构

Fig.2 Structure diagram of coaxial fixture



图 3 同轴夹具结构及火工药剂装填图
Fig.3 Structure of coaxial fixture and loading drawing of initiating explosives

同轴结构腔体中, 使试验样品腔体装填满火工药剂。

2.1.2 基于测试结构的介电特性反演

一般来说, 材料的介电常数无法直接进行测量, 因此目前多是通过建立数学模型, 间接反演得到。微波电磁特性测量技术是在一种较宽的频带内获取材料电磁参数的方法, 本系统测试频率范围是 1~18 GHz, 以传输反射法为理论基础。计算介电常数的传统方法 Nicolson-Ross-Weir (NRW) 方法具有宽频带和高精度的特点, 但却存在半波谐振、相角跳变和多值问题^[16-17]。其中, 多值问题的主流解决方法存在计算复杂、条件苛刻等问题, 在实际应用中有很多限制, 因此提出利用深度学习进行介电常数的预测。预设变量 y (介电常数实部 ϵ_r 和损耗角正切 z_{er}) 和变量 X (频率、 S_{11} 幅值、 S_{21} 幅值、 S_{11} 相位值、 S_{21} 相位值), 寻找它们之间存在关联关系, 那就代表在 X 取固定值之后 y 有其对应的概率分布。因此, 可将反演问题看作一种回归问题^[18-19]:

$$y = f(X) + \epsilon \quad (9)$$

式中: 变量 y 即为文本中的介电参数 ϵ_r 和 z_{er} , 被称为解释变量或因变量; X 为自变量; ϵ 为随机误差^[20-21]。回归模型可以分为线性回归和非线性回归两大类, 本反演设计属于线性回归模型, 是利用数理统计中回归分析, 来确定 2 种或 2 种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法, 又因有多个变量, 因此为多元线性回归^[22-23]。使用 Python 自带的 qt design 这个插件设计 UI 界面后, 设计的基于神经网络算法的火工药剂介电常数反演 APP 如图 4 所示^[24-26]。

2.2 火工药剂介电常数测试

利用宽频段同轴夹具, 搭建了基于矢量网络分析仪的火工药剂介电常数测试系统, 如图 5 所示。采用的矢量网络分析仪型号为 Agilent E8363C, 样品选择 HY-5 黑火药, 样品粒径为 0.63~1.18 mm, 试样样品

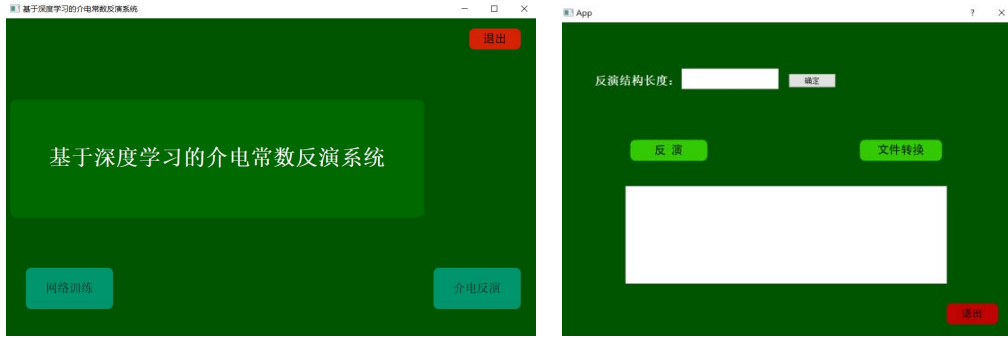


图4 App主界面
Fig.4 App main screen

如图6所示。样品松装至同轴结构装药腔内，同轴夹具上下部分用螺纹拧紧固定。测试时，首先在矢网中设置频率范围为1~18 GHz，并选择要测试的 S_{11} 和 S_{21} ，选择需要测量的点数(实测中选择的1 001个点)，然后进行校准。校准后，将填充好火药的同轴测量结构连接上矢网，测量 S_{11} 曲线和 S_{21} 曲线，将测试结果保存为 s2p 格式。

将 S 参数整理成输入数据集的标准格式后，输入

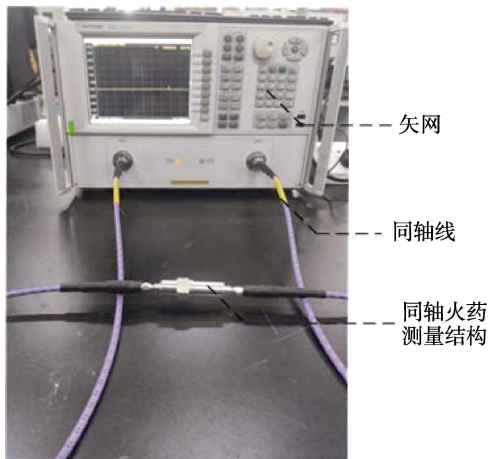


图5 测量系统
Fig.5 Measuring system



图6 试验样品
Fig.6 Test samples

基于前馈神经网络的反演 APP 中，利用 APP 软件进行“介电反演”，获得火工药剂不同频率下的介电常数实部数据 ϵ_r 及损耗角正切数据 z_{er} 。火工药剂介电常数的测量结果见表1和图7。

表1 黑火药 S 参数及其介电常数(部分)
Tab.1 S parameter and dielectric constant of black powder (partial)

频率/ GHz	S_{11} 幅值	S_{11} 相位值	S_{21} 幅值	S_{21} 相位值	ϵ_r	z_{er}
1	-37.72	-164.07	-0.18	-139.27	2.13	0.19
1.051	-37.36	-179.64	-0.19	-146.53	2.11	0.22
1.102	-36.53	-177.41	-0.20	-153.68	2.13	0.21
1.153	-37.32	169.28	-0.20	-160.76	2.57	0.14
1.204	-36.27	158.11	-0.19	-167.89	2.57	0.15
1.255	-38.26	142.75	-0.20	-175.06	2.48	0.14
1.306	-35.99	134.17	-0.21	177.87	2.61	0.23
1.357	-36.22	128.21	-0.21	170.76	2.62	0.22
1.408	-35.16	114.85	-0.21	163.66	2.52	0.22
1.459	-34.97	95.99	-0.22	156.54	2.38	0.23
1.51	-34.49	94.07	-0.22	149.40	2.41	0.22
1.544	-34.19	85.58	-0.20	144.50	2.36	0.19

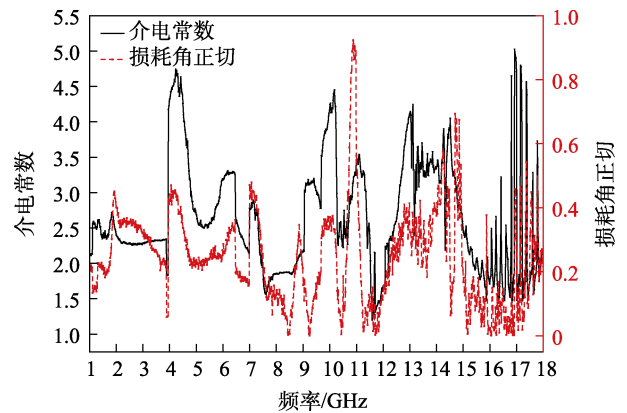


图7 黑火药介电常数实部及损耗角正切
Fig.7 Tangent of dielectric constant and loss angle of black powder

从火工药剂介电常数测试结果来看，在1~18 GHz,介电常数实部及损耗角正切都随着频率的

变化而变化。黑火药介电常数实部的变化范围为1.0~5.0,在4.52 GHz,出现最大值4.91。损耗角正切的变化范围为0.05~1.0,在14.35 GHz,出现最大值0.97。火工药剂从微波辐射场中吸收的能量正比于其自身的介电损耗角正切,火工药剂介电常数及损耗角正切最大的微波频点即为微波响应谐振点,这些频点可为火工药剂的安全防护提供技术支撑。

3 结语

1) 设计与研制了具有宽频带高传输效率工作特性的同轴线作为测试传感器,该同轴结构夹具对被测试样品介电常数变化有高度灵敏特性,适用于不同形状、不同粒度的火工药剂。

2) 运用神经网络算法,完成了火工药剂介电常数测试反演系统的APP研制。输入特定频率和 S 参数后,可自动计算宽频段介电常数的数值计算并显示,完成了火工药剂介电常数的测试。

3) 建立了火工药剂介电常数测试系统,测量了火工药剂黑火药HY-5的介电常数及损耗角正切,获得了火工药剂介电常数随着频率的变化规律,对火工药剂微波辐照场中响应特性研究提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 劳允亮,盛涤伦.火工药剂学[M].北京:北京理工大学出版社,2011.
LAO Y L, SHENG D L. The Science of Initiating Explosives and Relative Composition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011.
- [2] 潘涛.复杂系统的强电磁脉冲耦合效应分析[D].南京:南京理工大学,2020.
PAN T. Analysis of Strong Electromagnetic Coupling Effects in Complex System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [3] KLINE D J, REHWOLDT M C, TURNER C J, et al. Spatially Focused Microwave Ignition of Metallized Energetic Materials[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127: 055901.
- [4] FERNANDO W F M, RODRIGO W D A, SWIJAYAPALA W D A. Effects of Electromagnetic Fields due to High Voltage Transmission Lines on Detonator Firing Circuits[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2021(2): 55-68.
- [5] 马骏,张瑞江,高兴勇,等.典型桥丝式电火工品电磁耦合机理研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(2): 130-136.
MA J, ZHANG R J, GAO X Y, et al. Study on the Electromagnetic Coupling of Typical Bridge-wire Electro Explosive Device[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(2): 130-136.
- [6] 姚洪志,赵团,陈建华,等.电火工品时谐电磁场响应数值计算[J].火工品,2020(5): 23-26.
YAO H Z, ZHAO T, CHEN J H, et al. Numerical Calculation of Time Harmonic Electromagnetic Field Response of EEDs[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(5): 23-26.
- [7] 郁卫飞,张同来,左军,等.炸药研究中的微波效应及其机制[J].含能材料,2010(18): 558-562.
YU W F, ZHANG T L, ZUO J, et al. Microwave Effects and Mechanism in Explosive Materials[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010(18): 558-562.
- [8] 王鑫,张夫龙,孙希东,等.武器装备电磁环境适应性试验与评估技术综述[J].现代防御技术,2015,43(4): 7-12.
WANG X, ZHANG F L, SUN X D, et al. Review on Complex Electromagnetic Environmental Effects Adaptability Test and Evaluation Technology of Missile Weapon[J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(4): 7-12.
- [9] 杜斌.电雷管电磁场中差模响应特性[J].煤炭学报,2015,40(S2): 419-424.
DU B. Differential Mode Response Characteristics of Electric Detonator in Electromagnetic Field[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 419-424.
- [10] 吴俊军.多项式傅里叶变换的多分量线性调频信号瞬时频率估计[D].吉林:吉林大学,2009.
WU J J. Instantaneous Frequency Estimation of Multi-Component LFM Signals Based on Local Polynomial Fourier Transform[D]. Jilin: Jilin University, 2009.
- [11] JIN J M. The Finite Element Method in Electromagnetics[M]. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [12] M ISRA D K. IEEE Copyright Form[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987, 35(1): 87-88.
- [13] FAN S, STAEBELL K, MISRA D. Static Analysis of an Open-Ended Coaxial Line Terminated by Layered Media[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1990, 39(2): 435-437.
- [14] NYSHADHAM A, SIBBALD C L, STUCHLY S S. Permittivity Measurements Using Open-Ended Sensors and Reference Liquid Calibration-an Uncertainty Analysis[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(2): 305-314.
- [15] WEI Y Z, SRIDHAR S. Radiation-Corrected Open-Ended Coax Line Technique for Dielectric Measurements of Liquids up to 20 GHz[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(3): 526-531.
- [16] ERGIN A A, SHANKER B. Fast Evaluation of Three-Dimensional Transient Wave Field Using Diagonal Translation Operators[J]. J Comp Phys, 1998, 45: 157-180.
- [17] NELSON S O, BARTLEY P G. Open-Ended Coaxial-Line Permittivity Measurements on Pulverized Materials[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 133-137.
- [18] HARRINGTON R F. Time-Harmonic Electromagnetic Field[M]. New York: John Wiley and Sons, 2001.
- [19] ZHAO C J, JIANG Q X, JIN S H. Calibration-Independ-

- ent and Position-Insensitive Transmission/Reflection Method for Permittivity Measurement with One Sample in Coaxial Line[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(3): 684-689.
- [20] 花国良. 开口同轴探头法电磁参数测量系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
HUA G L. Research on Electromagnetic Parameters Measurement System Based on Open-ended Coaxial Line Method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [21] 毛帅. 电磁材料复介常数测量反演算法的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
MAO S. A Study on Inversion Algorithms for Measurement of Complex Constants of Media of Electromagnetic Materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts, 2013.
- [22] 韩利存. 粉末及液体材料的复介电常数的测试[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
HAN L C. Complex Permittivity Test of Power and Liquid Materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [23] 原玉. 电介质材料的介电行为研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
YUAN Y. A Study on Dielectric Properties Behaviours of Dielectric Materials[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012 .
- [24] BAKHTIARI S, GANCHEV S I, ZOUGHI R. Analysis of Radiation from an Open-Ended Coaxial Line into Stratified Dielectrics[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1994, 42(7): 1261-1267.
- [25] STUTZMAN M L, LEE M, BRADLEY R F. Broadband Calibration of Long Lossy Microwave Transmission Lines at Cryogenic Temperatures Using Nichrome-Films[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(12): 4596-4599.
- [26] ALWAN E A, KIOURTI A, VOLAKIS J L. Indium Tin Oxide Film Characterization at 0.1-20 GHz Using Coaxial Probe Method[J]. *IEEE Access*, 2015, 3: 648-652.