

文章编号: 2095-4980(2022)11-1163-06

基于闭式谐振腔的一体化介电常数测量系统

于明媚, 王 益, 张翠翠, 王建忠

(中国工程物理研究院 计量测试中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为替代矢量网络分析仪, 形成一套专用于闭式谐振腔的测量系统, 本文采用频谱分析仪模块和跟踪发生器模块, 基于 C++ 和 VISA 库函数进行系统控制, 使两模块可以同步收发射频信号, 实现闭式谐振腔谐振频率和 Q 值的测量功能, 最终实现微波介质材料的介电常数的测量, 形成一套一体化闭式谐振腔介电常数测量系统。该系统与矢量网络分析仪对比测量微波介质陶瓷材料 K65, 介电常数的相对误差为 5.5×10^{-3} , $\tan\delta$ 的相对误差为 -3.74×10^{-2} ; 对比测量材料 K35, 介电常数的相对误差为 -1.69×10^{-3} , $\tan\delta$ 的相对误差为 1.08×10^{-1} 。测量结果相对误差较小, 介电常数的相对误差小于 0.01, $\tan\delta$ 的相对误差小于 0.5, 说明一体化介电常数测量系统的测量结果准确, 可用于闭式谐振腔方法下的介电常数测量, 也可推广用于其他介电常数测量系统。

关键词: 介电常数; 一体化系统; 闭式谐振腔; 品质因数

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020443

Integrated permittivity measurement system based on closed resonant cavity

YU Mingmei, WANG Yi, ZHANG Cuicui, WANG Jianzhong

(Metrology and Testing Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In order to form a set of measurement system dedicated to the closed resonant cavity to replace the vector network analyzer, the spectrum analyzer module and the tracking generator module are adopted to control the system based on the C++ and VISA library functions and achieve the measurement function on the resonant frequency and the quality factor. Thereafter, the dielectric constant of the microwave dielectric material can be calculated, and a set of integrated closed cavity dielectric constant measuring system is formed. The system is employed to measure the microwave dielectric ceramic material K65 compared with the vector network analyzer. The relative error of the dielectric constant is 5.5×10^{-3} , the relative error of $\tan\delta$ is -3.74×10^{-2} . When measuring material K35, the relative error of the dielectric constant is -1.69×10^{-3} , and the relative error of $\tan\delta$ is 1.08×10^{-1} . The relative error of the dielectric constant is less than 0.01, and the relative error of $\tan\delta$ is less than 0.5, indicating that the measurement results of the integrated dielectric constant measurement system are accurate. It can be used for the dielectric constant measurement by the closed cavity method, and can also be extended to other dielectric constant measurement systems.

Keywords: permittivity; integrated system; closed resonant cavity; quality factor

微波技术广泛用于武器装备、航空航天、移动通信、微电子等领域, 是科技竞赛的主战场。微波介质材料作为精确制导系统、雷达探测和通信系统等方面应用的基础材料, 会极大地影响微波射频仪器和器件工作的性能^[1-12]。介电常数是表征微波介质材料的电性能主要参数, 国内外常采用闭式谐振腔法测量介电常数^[13-15], 其优点在于测量准确度高, 对样品制备要求较低, 易于操作实现。本实验室研制了一种微波介质材料测量系统, 该系统基于闭式谐振腔理论, 制作了不同谐振频率的闭式谐振腔体。由闭式谐振腔体作为材料夹具, 矢量网络分析仪作为测量仪器共同形成了一套闭式谐振腔法微波介质材料测量系统。文献[16]利用该系统测量了不同陶瓷材料的介电常数, 并采取典型材料和美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)标准介质样品进行测量比对。

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-11-30

基金项目: 装发技术基础基金资助项目(191ZW22001)

矢量网络分析仪性能优越,可测微波参数较多,但介电常数测量系统只需用到谐振频率和品质因数的测量功能,因此矢量网络分析仪功能冗余,加之其价格昂贵,体积较大,不适合与闭式谐振腔单独组成一套小型化专用介电常数测量系统。对此,本文采用模块化组件,替代矢量网络分析仪,与闭式谐振腔体共同搭建了一套小型化介电常数测量系统;开发控制软件,实现对测量系统的一体化控制,最后采用微波介质陶瓷材料 K65 和 K35 对测量系统进行验证,证明该系统可有效用于闭式谐振腔法下的介电常数测量。

1 闭式谐振腔法介绍

闭式谐振腔法是一种有效的介电常数测量方法。闭式谐振腔采用封闭的圆柱形金属腔体结构,在谐振腔两侧设有耦合孔,在其中支撑柱上放置被测材料样品。金属探针穿过耦合孔发射电磁波,使腔体内产生谐振,感应产生的电磁场再由金属探针耦合出来,用于介电常数的计算。闭式谐振腔法不仅抑制了辐射损耗,且计算模型明确,边界条件明确,属于准确度较高的介电常数测量方法。闭式谐振腔测量装置如图 1 所示。

闭式谐振腔的求解理论基于模式匹配和 Rayleigh-Ritz 法完成,该方法首先需要建立一组正交基函数,同时满足麦克斯韦方程组和闭式谐振腔的边界条件,并对其进行归一化。

利用这组正交基函数及其权函数可以建立方程组,对谐振腔内的电磁场重新进行描述,求解该方程即可得到介电常数与腔体谐振频率之间的关系^[16]。

利用 Rayleigh-Ritz 法将闭式谐振腔内的电磁场描述为:

$$\varphi = \sum_{n=1}^N \alpha_n \varphi_n \quad (1)$$

式中: φ 为电磁场分布函数; $\{\alpha_n\}$ 为权函数数集; $\{\varphi_n\}$ 为基函数集; N 为基函数的数目。基函数形式不具有唯一性,可根据需要的谐振腔测量模式选取,式(1)可表示为:

$$\varphi = \sum_{n=1}^N [\alpha_n^E, \alpha_n^H] \begin{bmatrix} \mathbf{E}_n \\ \mathbf{H}_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: α_n^E, α_n^H 为基函数系数; $\mathbf{E}_n, \mathbf{H}_n$ 为满足麦克斯韦方程组(3)和边界条件(4)的电场、磁场基函数。

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -j\omega\mu\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= -j\omega\varepsilon\mathbf{E} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_n \times \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{e}_n \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}_s \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{H}$ 为磁场磁感应强度; μ 为介质磁导率; ε 为介质介电常数; $\mathbf{e}_n$ 为单位法向量; $\mathbf{J}_s$ 为表面电流。进而得到方程组:

$$\sum_{n=1}^N (A_{mn} - \delta_{mn} \frac{1}{\omega^2}) \alpha_n^H = 0 \quad (5)$$

式中: $A_{mn} = \frac{\iint_V \varepsilon_r \varepsilon_0 \varphi_n \varphi_m}{\omega_m \omega_n}$, ω_m, ω_n 为所选用基函数的角频率, ε_r 为样品介电常数, $\varphi_m = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_m \\ \mathbf{H}_m \end{bmatrix}$, $\varphi_n = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_n \\ \mathbf{H}_n \end{bmatrix}$; δ_{mn} 为归一化函数; α^H 为基函数系数; ω 为被测样品加载后的腔体谐振角频率。

式(5)给出了介质加载条件下,腔体谐振频率与介质材料介电常数之间的关系,当测量得到腔体谐振频率之后,通过求解式(5),便可得到所需的介质材料介电常数值;然后根据式(6)可得到介电常数的损耗角正切。

$$\tan \delta = \frac{Q_D^{-1} - R_s/G}{P_{ed}} \quad (6)$$

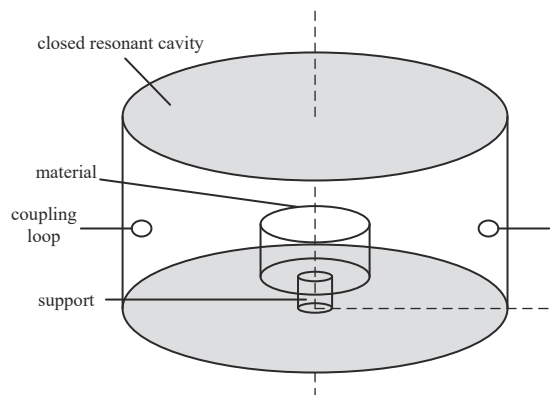


Fig.1 Closed cavity measuring device

图 1 闭式谐振腔测量装置

式中： Q_D 为谐振腔的有载品质因数； p_{ed} 为谐振腔的场分布因子； R_s 为谐振腔内壁表面电阻； G 为导电损耗因子。

2 一体化闭式谐振腔测量系统

2.1 系统方案

采用闭式谐振腔测量微波介质材料的介电常数，先要测得在加载材料样品前后谐振腔的谐振频率、品质因数(即 Q 值)等。闭式谐振腔测量系统一般包括闭式谐振腔、矢量网络分析仪、微波同轴线缆，其中矢量网络分析仪用来直接测量谐振频率、 Q 值等参数，其优势在于准确度高，可以快速测得实时数据，系统结构如图2(a)所示。矢量网络分析仪属于综合性仪器，在标量网络分析仪的基础上集合了相位测量等功能，对于闭式谐振腔系统，功能冗余，体积庞大，价格较高，不适合与闭式谐振腔共同组成一套介电常数专用测试系统。

本文提出一种闭式谐振腔测量系统方案，采用跟踪发生器模块和频谱分析仪模块组成模块化测量系统，分别作为信号输入和信号采集部分，通过上位机的自动控制软件对各模块进行一体化控制，即可快速准确测得谐振频率和 Q 值等参数，又可直接计算材料的介电常数，具有高性价比、小型化等优点。模块化测量系统结构如图2(b)所示。

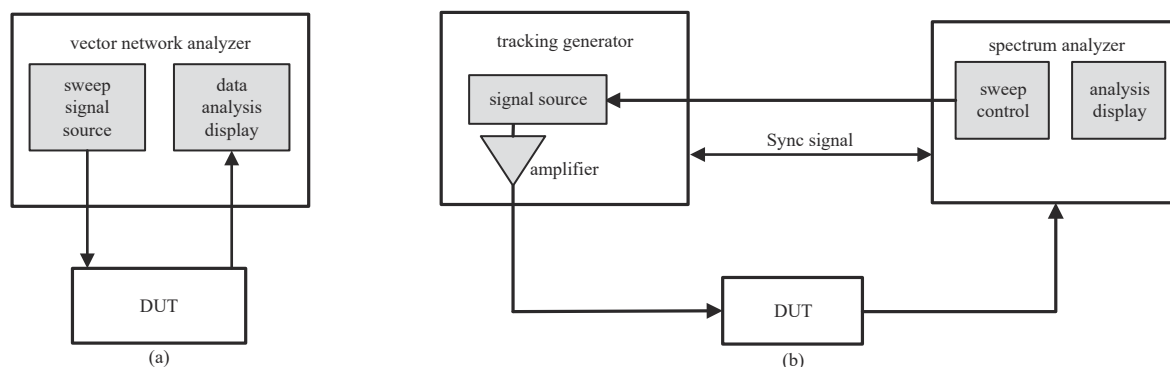


Fig.2 Diagram of vector network analyzer measurement system (a) and diagram of modular measurement system (b)

图2 矢量网络分析仪测量系统结构图(a)和模块化测量系统结构图(b)

2.2 系统搭建

一体化闭式谐振腔测量系统包括跟踪发生器模块、频谱分析仪模块、测试线缆和上位机。应用上位机通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)接口，基于C++和VISA函数库编写一体化介电常数测量软件，对各模块进行控制和参数计算。本系统采用Signal Hound公司的USB型跟踪发生器和频谱分析仪模块。跟踪发生器频率范围为100 kHz~12.4 GHz，幅度范围为-30~-12 dBm。频谱分析仪频率范围为100 kHz~12.4 GHz，动态范围为-151~+10 dBm，频率扫描速度为140 MHz/s，也可作为一个高动态范围测量接收器。跟踪发生器与频谱分析仪的接收频率同步，使用跟踪发生器可以测量设备的反射和发射特性，确定被测设备的频率特性。跟踪发生器和频谱分析仪模块体积小，测量结果快速准确，性价比高，可用应用程序接口(Application Programming Interface, API)控制。

两模块共用10 MHz晶振并连接同步信号，可以实现跟踪发生器和频谱分析仪模块之间的实时同步测量。频谱分析仪对跟踪发生器进行扫频控制，跟踪发生器发出扫频信号并放大，信号经过闭式谐振腔后，由频谱分析仪同步接收，得到闭式谐振腔的 S 参数，进而得到谐振频率，图3为一体化闭式谐振腔测量系统。

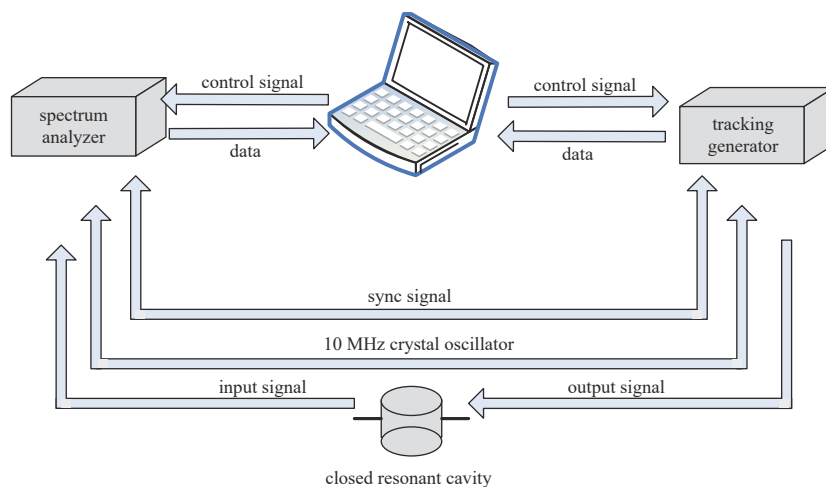


Fig.3 Integrated closed cavity measurement system

图3 一体化闭式谐振腔测量系统

2.3 介电常数测量软件

介电常数的测量在 2 种情况下进行：一种是闭式谐振腔为空腔的情况；另一种是闭式谐振腔载有样品的情况，因此介电常数测量软件由 3 部分构成：空腔谐振频率分析部分，样品谐振频率分析部分，介电常数计算部分。需要输入的参数包括预设频率、区间半宽度，能够实现空腔和加载样品情况下的谐振峰查找、谐振频率读取、半功率点(3 dB 点)查找、 Q 值计算、介电常数和损耗角正切值($\tan \delta$)的计算，流程图如图 4 所示。基于 VC++ 和 VISA 库函数编写一体化介电常数测量软件，软件界面如图 5 所示。

3 系统测试

基于闭式谐振腔方法，采用 Agilent 公司的 E5244A 型矢量网络分析仪与本文搭建的一体化介电常数测量系统分别对同种材料进行测试，测试材料为微波介质陶瓷材料 K65 和 K35，一体化闭式谐振腔测量系统实物图如图 6 所示。对于材料直径为 35 mm 的陶瓷材料 K65，矢量网络分析仪测量的谐振频率为 1.086 9 GHz， Q 值为 9 200，得到介电常数为 61.29， $\tan \delta$ 为 1.07×10^{-4} ；一体化介电常数测量系统测量的谐振频率为 1.079 2 GHz， Q 值为 9 600，得到介电常数为 61.63， $\tan \delta$ 为 1.03×10^{-4} 。如表 1 所示，介电常数的相对误差为 5.5×10^{-3} ，损耗角正切的相对误差为 -3.74×10^{-2} 。

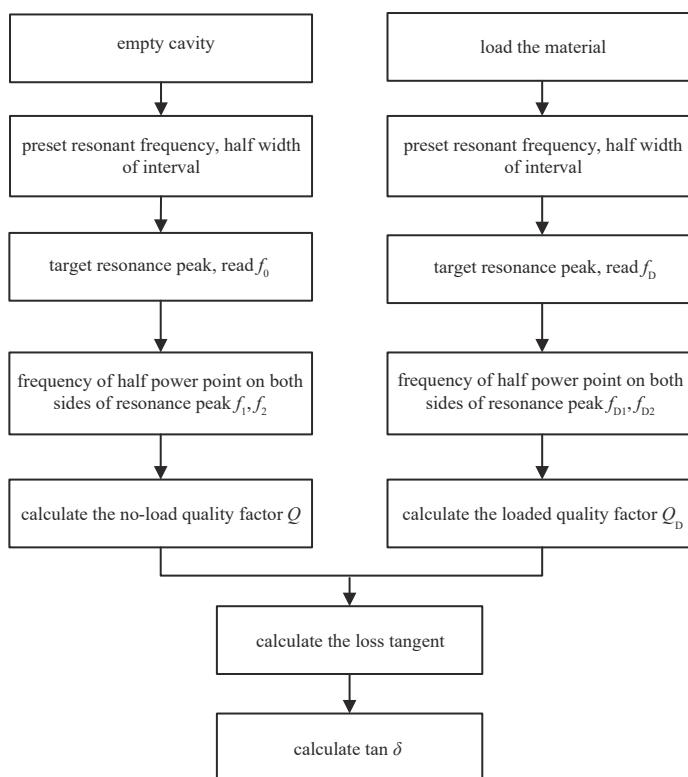


Fig.4 Flow chart of the permittivity measurement software

图4 介电常数测量软件流程图



Fig.5 Interface of integrated permittivity measurement software

图5 一体化介电常数测量软件界面

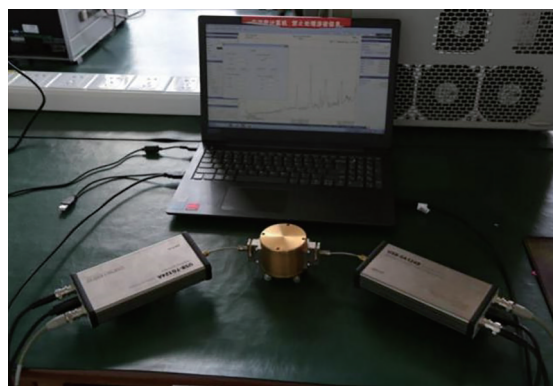


Fig.6 Picture of the integrated closed resonant cavity measurement system

图6 一体化闭式谐振腔测量系统实物图

对于材料直径为 35 mm 的陶瓷材料 K35，矢量网络分析仪测量的谐振频率为 1.438 6 GHz， Q 值为 13 600，介电常数为 35.54， $\tan \delta$ 为 7.21×10^{-5} ；一体化介电常数测量系统测量的谐振频率为 1.432 8 GHz， Q 值为 13 200，得到介电常数为 35.48， $\tan \delta$ 为 7.99×10^{-5} 。如表 2 所示，介电常数的相对误差为 -1.69×10^{-3} ，损耗角正切的相对误差为 1.08×10^{-1} 。由测量结果可见，一体化介电常数测量系统与矢量网络分析仪的测量结果相对误差较小，故结果准确可信。

表 1 K65 对比试验结果

Table1 K65 comparative test results

sample name	measurement method	resonant frequency/GHz	Q factor	dielectric constant	$\tan \delta$
K65	integrated dielectric constant measurement system	1.079 2	9 600	61.63	1.03×10^{-4}
	vector network analyzer	1.086 9	9 200	61.29	1.07×10^{-4}
	relative error	-7.08×10^{-3}	4.35×10^{-2}	5.5×10^{-3}	-3.74×10^{-2}

表 2 K35 对比试验结果
Table2 K35 comparative test results

sample name	measurement method	resonant frequency/GHz	<i>Q</i> factor	dielectric constant	$\tan \delta$
K35	integrated dielectric constant measurement system	1.432 8	12 300	35.48	7.99×10^{-5}
	vector network analyzer	1.438 6	13 600	35.54	7.21×10^{-5}
	relative error	-4.03×10^{-3}	-9.56×10^{-2}	-1.69×10^{-3}	1.08×10^{-1}

4 结论

本文采用频谱分析仪和跟踪发生器构建小型化介电常数测量系统，基于 C++ 和 VISA 函数库编写控制和参数计算软件，与闭式谐振腔组成一套一体化介电常数测量系统，用于测量微波介质材料的介电常数。通过与矢量网络分析仪测量相同的微波介质陶瓷材料 K65 和 K35，得出介电常数的相对误差小于 0.01， $\tan \delta$ 的相对误差小于 0.5。相对误差较小，说明一体化介电常数测量系统测量结果准确，满足闭式谐振腔介电常数测量的使用需求，也可推广用于其他介电常数测量系统，如分裂腔测量系统或开式腔测量系统等。

参考文献：

[1] RIDDLE B,BAKER-JARVIS J,KRUPKA J. Complex permittivity measurements of common plastics over variable temperatures [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(3):727-733.

[2] 高冲,李恩,李灿平,等. 介质材料介电常数均匀性测试评价系统[J]. 宇航材料工艺, 2019(4):80-83. (GAO Chong,LI En,LI Canping,et al. Permittivity homogeneity measurement system for dielectric material[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019 (4):80-83.)

[3] 黎义,李建保,何小瓦. 采用谐振腔法研究透波材料的高温介电性能[J]. 红外与毫米波学报, 2004,23(2):157-160. (LI Yi,LI Jianbao,HE Xiaowa. Research on high-temperature dielectric properties of wave-transmitting materials using resonant cavity method[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004,23(2):157-160.)

[4] ZHANG Yunpeng,LI En,ZHENG Hu. Electromagnetic parameters measurement of sheet using separate microstrip line[J]. Journal of Electronic Testing, 2019,35(4):567-572.

[5] 张云鹏,李恩,余承勇,等. 圆柱腔复介电常数高温测试系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(7):994-1001. (ZHANG Yunpeng,LI En,YU Chengyong,et al. Cylindrical cavity high-temperature measurement system for complex permittivity[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(7):994-1001.)

[6] 张康,武彤,滕俊恒. 开口同轴探头横电磁波模型法测量液体复介电常数[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(7):945-952. (ZHANG Kang,WU Tong,TENG Junheng. Transverse electromagnetic model based open-ended coaxial probe technique for liquid complex dielectric constant measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 945-952.)

[7] 冯旭文. VHF 频段复介电常数测试方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018. (FENG Xuwen. The measurement method of complex dielectric constant in VHP band[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2018.)

[8] 董晶. 基于亚波长谐振的复介电常数非接触测量[D]. 杭州:浙江大学, 2015. (DONG Jing. Non-contact measurement of complex permittivity based on sub-wavelength resonance[D]. Hangzhou,China:Zhejiang University, 2015.)

[9] 吴晓明,杨帆,解田,等. 基于传输反射法的等离子体相对复介电系数测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):273-277. (WU Xiaoming,YANG Fan,XIE Tian,et al. Measurement of relative complex permittivity of plasmas based on transport reflection method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):273-277.)

[10] 刘长江. 宽频带低损耗介质微波复介电常数测试技术的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2005. (LIU Changjiang. Research on microwave complex permittivity measurement technology of broadband and low-loss dielectric[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2005.)

[11] LI En,NIE Zaiping, GUO Gaofeng, et al. Broadband measurements of dielectric properties of low-loss materials at high temperatures using circular cavity method[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2009(92):103-120.

[12] 吴超. 透波材料高 *Q* 腔法复介电常数变温测试技术的研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009. (WU Chao. Research on high-*Q* cavity method complex permittivity variable temperature measurement technology for wave-transmitting materials[D]. Chengdu, China:University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)