



# 开盲盒式微波技术基础课程系列 测量实验方案设计

王亚飞, 李兴华, 张兰杰, 赵彦晓

(北京信息科技大学 信息与通信工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 微波测量是微波工程中的重要环节, 为了培养学生微波测量的实践能力和工程应用能力, 在微波技术基础课程中设计了开盲盒式微波测量“探究性—验证性”系列实验。开盲盒式微波测量系列实验以测量驻波比、负载阻抗、二端口网络  $S$  参量等为内容, 在同一个测量实验中, 设置多个测量对象但不给出测量对象的基本指标, 以开盲盒的方式测量微波器件, 增加了实验结果的不确定性。同时在测量对象中设置“隐藏款”, 以锻炼与检验学生的微波工程实践能力和分析解决问题的能力, 为学生进一步设计微波元件打下技术基础。

**关键词:** 微波技术; 微波测量实验; 盲盒; 矢量网络分析仪

中图分类号: G642; TN015

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240099

## Design of Measurement Experiments for the Basic Microwave Technology Course Based on Opening Blind Box

WANG Yafei, LI Xuehua, ZHANG Lanjie, ZHAO Yanxiao

(School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Microwave measurement is an important part of microwave engineering. In order to cultivate students' practical and engineering application abilities in microwave measurement, an “opening blind box” series of inquiry-validation experiments is designed for the course of Microwave Technology. The series experiments of “opening blind box” microwave measurement focus on measuring standing wave ratio, load impedance, two-port network  $S$ -parameters, etc. In each measurement experiment, multiple measurement objects are set without providing basic indexes, and microwave device are measured through “open blind box” method, which increases the uncertainty of the experimental results. At the same time, “hidden items” are set in the measurement objects to exercise student's microwave engineering practical ability and problem-solving ability, which establishes a technical foundation for students to further design microwave components.

**Key words:** microwave technology; microwave measurement experiment; blind box; vector network analyzer

微波技术基础是电子信息类等相关专业一门非常重要的专业课, 其理论性较强, 概念比较抽象, 在学习过程中学生难以深入理解<sup>[1-2]</sup>。特别是目前理论教学与微波工程实际存在着一定脱节的现象, 为了解决这一问题, 必须通过实验环节来弥补理论与实际之间的鸿沟<sup>[3]</sup>。另一方面, 由于成本问题, 该课程不像电路理论基础课程所涉及的阻抗元件、运放、逻辑门电路元件等那么容易接

触到, 所以微波技术基础课程的实验多以软件仿真<sup>[4-8]</sup>和虚拟仿真实验<sup>[9-12]</sup>为主。同时作为验证微波器件性能的微波测量, 在培养学生的实践能力、工程应用能力等方面发挥着更重要的作用, 是微波工程中非常重要的环节。

微波测量相关实验是微波技术基础课程的重要组成部分<sup>[13]</sup>。为了培养学生在微波技术领域的工程实践能力, 特别是能与微波工程的实际接

收稿日期: 2024-02-28

基金项目: 2021 年北京高等教育本科教学改革创新项目(2021-178); 北京市高等教育学会 2023 年立项面上课题 (MS2023086); 2022 年北京高等教育本科教学改革创新项目(2022-220)。

作者简介: 王亚飞, 博士, 正高级实验师, 主要从事微波技术教学和电磁兼容等方面的研究。E-mail: 20061590@bistu.edu.cn

轨,使学生接触到现代微波测量仪器,使其具有使用现代微波测量仪器进行实际测量的能力以及分析问题和解决问题的能力,北京信息科技大学通信工程专业从 2006 年起建设了微波射频实验室。目前实验室拥有矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)8 台(300 kHz~3 GHz 6 台; 10 MHz~40 GHz 2 台),近年又更新建设了以微波测量线为主要内容的微波测量实验系统 8 套。新阶段,面向学校高素质应用型创新人才的培养目标,在以工程教育认证为导向的课程方案设计理念下<sup>[14]</sup>,在以往微波测量验证性实验<sup>[15]</sup>的基础上持续改进,升级为“探究性—验证性”实验。以“开盲盒”方式设计了以测量驻波比、负载阻抗、二端口网络  $S$  参量等为内容的微波测量系列实验方案,使学生具备使用现代微波测量仪器的能力,测量微波元件性能的工程实践能力,理论联系实际、分析与解决问题的能力,以及掌握相关理论与设计微波元件的能力,提高了微波技术基础课程的实验教学水平和人才培养水平。

## 1 微波系列测量实验的总体设计思路

### 1.1 将验证性实验升级为“探究性—验证性”实验,提高微波技术课程实验水平

改变以往微波技术基础课程中学生对验证性实验重视程度不够、实验内容不深入、印象不深刻、实践能力锻炼不够等问题,把原来学生“一走一过”的验证性实验变为“久久为功”的“探究性—验证性”实验,从微波工程的实际出发,增加实验探究的环节,增强学生探究的兴趣,使学生必须通过探究才能完成实验,改变原来按部就班就可以完成的验证性实验模式,提高微波技术课程的实验水平。

### 1.2 以“开盲盒”方式进行微波测量实验,提高学生解决问题能力和工程实践能力

将“开盲盒”的实验形式引入到微波技术基础课程中,增加了实验结果的不确定性。实际上是倒逼学生去学习微波技术基础理论,因为只有在扎实理论的基础上,才可能把握住测量结果,对测量中出现的各种意想不到的情况进行有效的处理。在工程实际中,会遇到诸如根本不知道测量对象的基本指标,而要通过实际测量才能得到的问题。以开盲盒方式进行测量实验,在提高学生在学习热情的同时也有效地培养学生解决问题能

力和工程实践能力。

### 1.3 在实验测量对象中设置“隐藏款”,增加实验测量难度,培养学生的自信心和科学探索精神

在实验中设置实验测量对象“隐藏款”,增加了实验的测量难度,同时培养学生的自信心和科学探索精神。如果学生在测量“隐藏款”时,能正确分析问题与现象,明确在测量的各个环节排除了问题,相信所测结果即是所得结果,那么通过这样的实验,学生的自信心就会得到很大的提升。自信是一名工程技术人员应该具备的素养,但自信也一定是在坚实的理论和丰富的实践活动基础上获得的。因此,在实验中设置测量对象“隐藏款”,将有利于增强学生的自信心。同时,为了获得正确结果,学生需要通过反复的实验、对比和排除,这将激发学生的探索精神和严谨的科学态度,为以后的工程实践打下良好的基础。

## 2 开盲盒式微波测量实验的设计方案

### 2.1 微波驻波比测量实验设计

#### 1) 实验目标

① 认识微波测量线装置,学习微波信号源和选频放大器的使用方法,使学生具备使用微波测量仪器的能力。

② 理解终端负载的改变对驻波比的影响,掌握利用微波测量线测量终端负载驻波比的方法,使学生具备测量驻波比的工程实践能力。

③ 掌握不同驻波比矩形波导负载的结构,使学生具备设计矩形波导的能力。

#### 2) 实验原理

在一个微波传输系统中,如果有任何阻抗的不连续,那么在阻抗的不连续处将产生与入射波频率相同、传播方向相反的反射波。反射波与入射波在微波传输系统中叠加,会形成一个位置固定、周期分布的电场和磁场,这就是微波中的驻波。如图 1 所示,在微波测量线实验系统中,微波信号源工作在方波调制状态,微波信号输入至波导测量线,波导测量线是在波导的宽边中央开有一个狭槽的装置。当把带有检波器的金属探针由狭槽伸入到波导测量线中时,因为探针与电场平行,所以波导测量线中电场的变化在探针上感应出电动势,再经过晶体检波器就变成了信号。由于波导负载的影响,在波导测量线中可以形成

驻波, 通过移动波导测量线探针端的位置, 可以检测出与驻波图形相对应的信号, 如图 2 所示,

将测量线探针取得的信号送至选频放大器可以读出相邻最大值点与最小值点所对应的数值<sup>[16]</sup>。

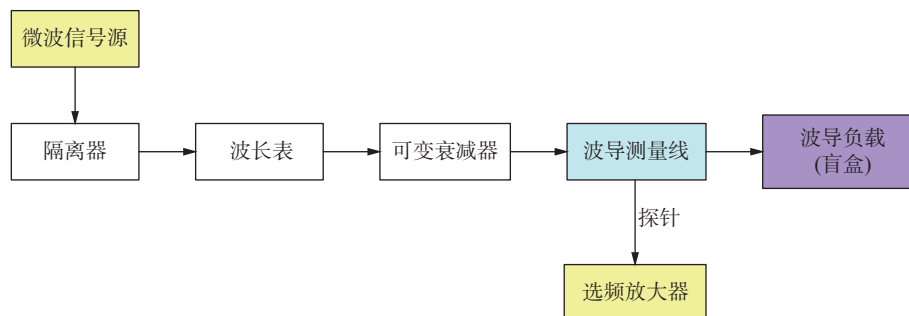


图 1 微波测量线实验系统图



图 2 利用微波测量线测量驻波比实物图

由于二极管检波器工作在小信号平方律检波下, 因此选频放大器上的数值与波导测量线中探针所在点的电场平方成正比, 于是驻波比为:

$$\rho = \sqrt{V_{\max}/V_{\min}} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为驻波比;  $V_{\max}$  和  $V_{\min}$  分别为选频放大器上测得的最大值点与最小值点所对应的数值。

### 3) 实验过程设计

在如图 1 所示的微波测量线实验系统中, 提供给学生波导负载盲盒, 盲盒中含有 3 种波导负载款式, 均隐去具体指标。3 种波导负载对应的驻波比分别为 1.5、5~6、1, 从外观上无法完全分辨。其中驻波比为 1 的即为匹配负载, 设定为“隐藏款”, 要求学生完成 3 种波导负载的驻波比测量。当学生在测量线终端接上“隐藏款”时, 在微波信号源与选频放大器调试完成后, 无论探针在测量线上怎样移动, 选频放大器上的数据指针将相对不变, 或者变化极其微小, 实际的连接也会造成误差。这给学生确认测量结果增加了困惑和难度, 因为要确认这种现象是测量设备没有调试好、连接不正确、或是负载本身的驻波比造成的, 这就提高了学生的测量能力、分析能

力和排除问题的能力。由于学生不知道波导负载的驻波比, 因此需要对失配负载进行多次测量、反复测试、排除问题, 才能确认最终的结果。

在测量结果确认后, 相当于学生已经打开了盲盒, 要求学生再次观察波导负载结构, 引导学生思考“这 3 种波导负载为什么能在测量线上呈现出不同的驻波比”“在结构上具有哪些异同点”“如果设计一个波导负载应该调整哪些参数”的问题。匹配负载是一个接近于全吸收的波导终端, 有一片劈形镀金属的吸收片放在波导的轴线位置。在波导中电场最强处吸收微波能量, 劈尖的长度越长吸收越好, 匹配性能越好, 吸收片相对于法兰的距离是固定的。失配负载即驻波比不为 1 的负载, 既吸收一部分微波功率又反射一部分微波功率, 具有某一固定的驻波比。失配负载的外形与匹配负载是基本一样的, 只是在波导口径的尺寸上或者内部结构上有差别, 使之具有一定的反射。学生通过开盲盒测量得到结果, 结果确定相当于打开了盲盒, 再观察波导负载, 思考波导负载结构与参数, 为下一步设计波导夯实基础。

## 2.2 同轴负载阻抗测量实验设计

### 1) 实验目标

① 认识矢量网络分析仪, 熟悉矢量网络分析仪的使用方法, 使学生具备使用现代微波测量仪器的能力。

② 理解校准对微波测量结果的影响, 掌握利用 VNA 进行阻抗测量的方法, 使学生具备微波实际测量的工程实践能力。

③ 掌握 Smith 圆图在现代微波设备测量中的显示形式, 使学生具备理论联系实际的能力。

## 2) 实验原理

首先利用 VNA 测量标准校准件, 然后存储测量结果与真实结果的矢量差, 再利用存储的结果来消除后面的对待测器件测量中系统误差的过程即为校准。校准的目的是提供被测器件和 VNA 终端纯电阻连接, 提供给测试端口零幅度、零相移、纯特性阻抗的信号<sup>[17]</sup>。本实验即为测量校准件中的匹配器、短路器、开路器 3 种负载阻抗。由于负载阻抗不可能完全理想, 因此短路器、开路器对应的等效元件模型如图 3 所示。

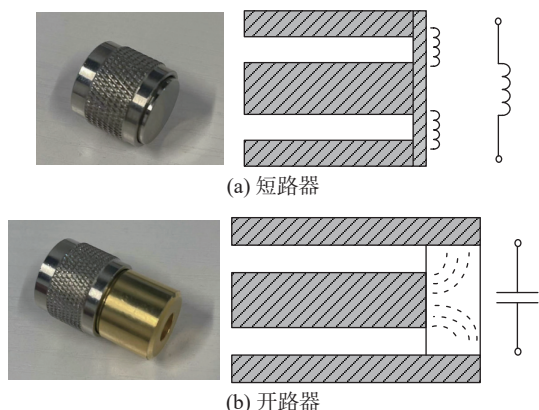


图 3 短路器、开路器对应的等效电路模型

## 3) 实验过程设计

在如图 4 所示的同轴负载阻抗校准件测量中, 提供给学生同轴负载阻抗盲盒, 盲盒中含有 3 种同轴负载阻抗款式, 均隐去具体指标。3 种同轴负载阻抗分别为匹配器、短路器和开路器, 从外观上无法完全分辨。其中, 开路器设定为“隐藏款”, 要求学生完成 3 种同轴负载阻抗测量。当学生在矢量网络分析仪端口 1 连接“隐藏款”时, 选择以 Smith 圆图形式显示测量结果, 会发现连接“隐藏款”时, 结果界面数据变化较小, 这里也给学生测量增加了困惑和难度。要确认这种现象是测量设备没有设置好、连接不可靠、负载阻抗本身造成的, 还是其他因素。和前一个实验一样, 学生要具备一定的分析问题与解决问题的能力才能得到正确的测量结果。因为学生事先不知道自己所测量的负载是匹配器、短路器还是开路器, 所以只能以测量结果来确认。这就要求学生要理论联系实际, 掌握理论上匹配器、短路器、开路器在 Smith 圆图上的位置, 同时还要根据图 4 所示的等效电路模型, 来明确无论是匹配器、短路器或者开路器, 在 Smith 圆图上都不可

能是理论上的一个点, 如图 5 所示, 这就是理论与微波工程实际的差距。学生要体会到这一点, 并能够根据测量结果读出短路器对应的等效电感值和开路器对应的等效电容值。同时引导学生思考校准这个环节对微波测量的意义, 不校准或者校准不精准会导致哪些問題, 对测量结果有什么影响。

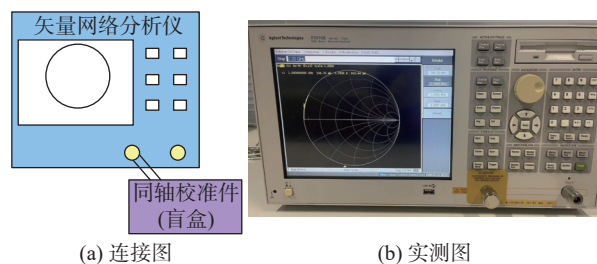


图 4 同轴负载阻抗校准件测量的连接与实测图

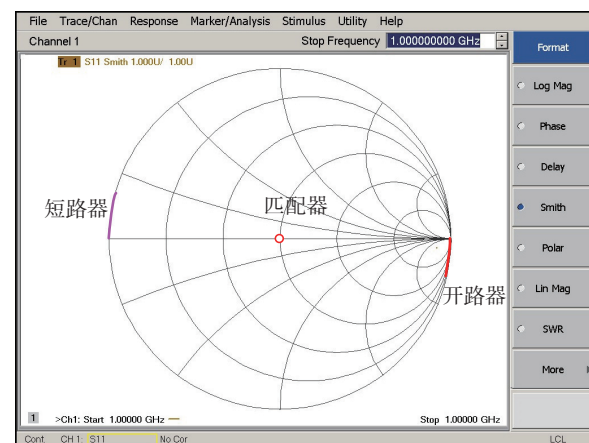


图 5 不同负载阻抗在 VNA Smith 圆图上的显示图

## 2.3 二端口网络 $S$ 参量测量实验设计

### 1) 实验目标

① 熟练 VNA 的使用方法, 使学生具备熟练使用现代微波测量仪器的能力。

② 掌握使用 VNA 进行二端口微波器件  $S$  参量测量的方法, 使学生具备微波实际测量的工程实践能力。

③ 掌握微波网络理论, 使学生明确实际工程中回波损耗、插入损耗在二端口微波滤波器上的物理意义, 掌握二端口微波滤波器的结构设计。

### 2) 实验原理

微波网络理论是把一个微波系统用一个网络模型来等效, 把本质上是电磁场的问题转化为一个网络问题, 用网络理论来分析一个微波系统各端口之间的关系, 在不需要了解系统内部电磁场

分布的情况下得到系统的外部特性<sup>[18]</sup>。微波网络方法是微波工程中重要的分析手段。对于一个具体的微波网络, 只要给出其全部散射参量即  $S$  参量, 那么它的全部入射波、反射波之间的关系就确定了, 因此网络的特性也就得以确定。对于一个二端口微波带通滤波器,  $S_{11}$  和  $S_{22}$  反映了二端口滤波器上端口的反射情况。 $S_{21}$  和  $S_{12}$  反映了二端口滤波器上端口间的传输情况。在微波工程中, 经常用回波损耗  $L_R$  来反映反射特性, 回波损耗单位 dB, 由式(2)计算得到:

$$L_R = -20 \lg |S_{11}| (\text{dB}) \quad (2)$$

用插入损耗  $L_I$  来反映传输特性, 插入损耗单位 dB, 由式(3)计算得到:

$$L_I = -20 \lg |S_{21}| (\text{dB}) \quad (3)$$

### 3) 实验过程设计

在如图6所示的二端口网络  $S$  参量测量连接中, 提供给学生的二端口微波滤波器盲盒, 如图7所示, 盲盒中含有3种微波滤波器款式, 均隐去中心频率、带宽等参数。3种微波滤波器分别为: 中心频率 2 GHz, 带宽 200 MHz; 中心频率 2 GHz, 带宽 400 MHz; 微波隔直器, 从外观上无法完全分辨。其中微波隔直器设定为“隐藏款”, 要求学生完成3种微波滤波器  $S$  参数测量。当学生在矢量网络分析仪端口1和端口2上接上“隐藏款”后再设置好仪器相关参数测量时, 会发现连接“隐藏款”时, 无法通过  $S$  参量确定滤波器的中心频率和带宽。这里依旧给学生测量增加了困惑和难度, 同样要确认这种现象是测量设备没有设置好、连接不正确、微波滤波本身性能或者其他因素造成的, 需要学生具备解决问题的能力。因为学生事先不知道自己所测量微波滤波器的指标参数, 所以只能以测量结果来验证。使用VNA测量时, 在扫描功能上还要考虑测量精度和速度的要求, 同时要求学生掌握工程实际中回波损耗、插入损耗与  $S$  参量的关系。在测量结果完成后, 学生打开微波滤波器外壳, 观察研究微波滤波器的结构, 明确微带滤波器的等效电路模型, 为进一步设计微波元件打下基础。

以上3个实验内容涵盖了微波技术中的传输线理论、波导、微波网络、Smith圆图工具等相关重要内容, 反映了从微波传输的角度来阐述微波技术的基础理论和方法, 这也是研究微波技术其

他方面的基础。在实验教学方法上, 引导学生进行探究性实验, 从结果上又以验证性实验为终点, 完成对正确性能参数的验证, 形成“探究性—验证性”实验, 为学生树立工程思维, 激发科学探索精神, 提高工程实践能力奠定基础, 这将对提高微波技术基础课程的实验教学水平发挥重要作用。

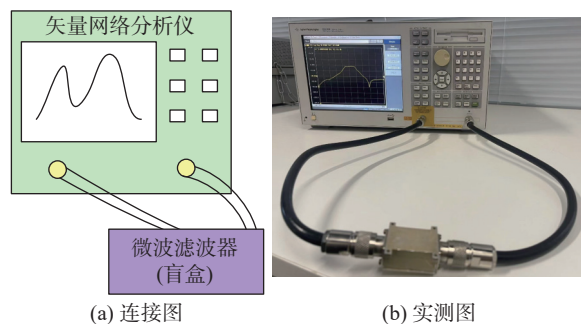


图6 微波滤波器  $S$  参量测量的连接与实测图

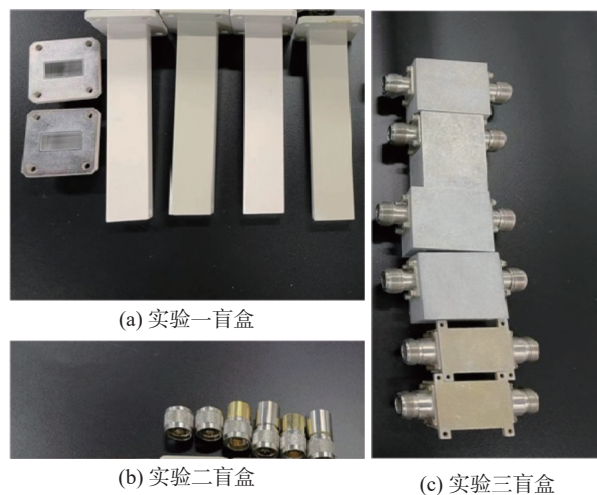


图7 3个实验中测量对象“盲盒”实物图

## 3 结束语

在微波技术基础课程中设计了“开盲盒”式系列微波测量实验, 该实验形式改变了以往验证性实验多是走流程的实验路径, 解决了学生对实验内容记不住、留不下、学不到等问题, 以“探究性—验证性”实验的方式提高了学生参与微波实验的热情, 锻炼了学生微波测量的工程实践能力和理论联系实际的能力, 树立工程思维的同时也培养了学生的自信心和科学探索精神。

## 参考文献

- [1] 潘柏操. 电磁仿真在微波技术色散特性实验中的

- 应用[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(5): 171-174.
- [2] 赵同刚, 赵安新, 陈迅. 电磁场与微波技术实验教学改革和探索[J]. 北京邮电大学学报(社会科学版), 2015, 17(3): 101-105.
- [3] 柴豆豆, 杨洋, 章承诺, 等. 微波技术基础实验教学改革探索[J]. 合肥师范学院学报, 2019, 37(6): 122-124.
- [4] 李淑娟, 陈振元, 马桂英, 等. HFSS 技术在微波实验中的应用研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(1): 12-15.
- [5] 王亚飞, 李兴华. 基于 ADS 软件的微波技术系列实验设计[J]. 中国电力教育, 2014(26): 74-75.
- [6] 屈乐乐, 杨天虹, 胡爱玲, 等. 基于 HFSS 的微波器件仿真实验设计与应用[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(3): 86-89.
- [7] 马立宪, 陈帅. ADS 与 HFSS 软件在微波技术与天线实验中的应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2020, 36(7): 42-45.
- [8] 张海勇, 秦艳. 微波技术教学中仿真实验设计与应用[J]. 信息通信, 2020(11): 94-97.
- [9] 李晓峰, 薛小荣, 梁兰花. 基于 Unity3D 的矢量网络分析仪虚拟实验系统的设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 134-137.
- [10] 李晓峰, 薛小荣, 廖欣. 微波传输线 3D 虚拟实验系统设计与实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(6): 44-46.
- [11] 闫奕名, 赵春晖, 廖艳苹, 等. 微波二端口网络[S]参量测量虚拟仿真实验系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(12): 144-148.
- [12] 闫奕名, 赵春晖, 廖艳苹, 等. 微波波导负载阻抗测量与匹配虚拟仿真实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(11): 192-196.
- [13] 张兰, 高玉斌, 徐鸿, 等. 微波技术实验中衰减测量实验设计[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(5): 24-28.
- [14] 李兴华, 王亚飞, 杨尚文, 等. 以工程教育认证为导向的“无线通信综合实践”课程方案设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(4): 217-220.
- [15] 王亚飞, 杨曙辉, 李兴华. 微波技术实践教学三维设计方案[J]. 实验科学与技术, 2015, 13(4): 69-72.
- [16] 顾继慧. 微波技术[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014.
- [17] 李秀萍, 高建军. 微波射频测量技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [18] 王亚飞. 微波技术简明教程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2023.

编辑 葛晋