

BOPPPS教学方法在本科生高功率微波天线测量实验中的应用研究

孙云飞, 宋莉莉, 巨金川, 党方超*

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年6月10日; 录用日期: 2025年9月3日; 发布日期: 2025年9月12日

摘要

BOPPPS教学模型是一种以目标为导向、以学生为中心的教学设计模型, 在现代教育中极具实用性。本文将BOPPPS模型引入到本科生“高功率微波天线测量”的实验教学中, 探索BOPPPS教学模型对本科生实验教学设计的指导作用, 通过互动式学习激发学生学习兴趣, 提升学习效率。结果表明, 通过引入BOPPPS教学模型, 学生的学习目标更加明确, 参与度更高, 课堂更加活跃, 教学质量得到显著提升, 为本科生实验教学设计和改革提供了参考与借鉴。

关键词

BOPPPS教学模型, 高功率微波, 天线测量

The Application Research of the BOPPPS Teaching Method in High Power Microwave Antenna Measurement of the Undergraduate Experimental Course

Yunfei Sun, Lili Song, Jinchuan Ju, Fangchao Dang*

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: Jun 10th, 2025; accepted: Sep. 3rd, 2025; published: Sep. 12th, 2025

Abstract

The BOPPPS model is a teaching design model oriented by teaching objectives and centered on

*通讯作者。

文章引用: 孙云飞, 宋莉莉, 巨金川, 党方超. BOPPPS 教学方法在本科生高功率微波天线测量实验中的应用研究[J]. 创新教育研究, 2025, 13(9): 412-418. DOI: 10.12677/ces.2025.139714

students, which is highly practical in modern education. This paper introduces the BOPPPS model into the experimental teaching of “High-Power Microwave Antenna Measurement” for undergraduates, explores the guiding role of the BOPPPS teaching model in the experimental teaching design for undergraduates, and stimulates students’ learning interest and improves learning efficiency through interactive learning. The results show that by utilizing the BOPPPS teaching model, students’ learning objectives become clearer, their participation is higher, the classroom is more active, and the teaching quality is significantly improved, providing reference and inspiration for the experimental teaching design and reform of undergraduates.

Keywords

BOPPPS Instructional Model, High Power Microwave, Antenna Measurement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高功率微波(High Power Microwave, HPM)天线是高功率微波系统的终端[1]-[3], 其功能是将高功率微波以特定的极化方向高效地定向辐射出去。高功率微波天线技术可以认为是常规天线技术的延伸, 但是受限于功率容量, 常规微波天线在高功率微波领域难以应用。此外由于高功率微波源的输出模式、脉宽等限制, 使得高功率微波天线需要考虑更多的因素。在高功率微波领域, 天线性能的准确测量一直是重点研究内容之一。

高功率微波天线测量的核心技术指标有方向图、增益以及功率容量。方向图的测试方法通常有远场法和近场法。由于高功率微波天线工作频段较高, 远场距离较远, 在实验室难以满足远场条件, 因此在实验教学时以近场法为主。增益测试一般与方向图测试同步开展, 其方法有绝对值法、比较法和三天线法, 本实验中采用的是比较法。功率容量测试是高功率微波天线测试的独有内容, 也是实验教学的重点之一。在下·本科生“高功率微波天线测量”实验中, 传统教学模式常面临以下痛点: 学生对实验原理理解不深入, 仅机械完成操作步骤; 课堂互动不足, 难以激发探索性思维; 实验报告流于形式, 缺乏对测量误差的深度分析。因此, 探索新的教学模式十分必要。

BOPPPS 教学方法[4]源于加拿大教师技能培训体系 ISW (Instructional Skills Workshop), 它将课堂教学过程分解为六个前后衔接的环节[5]-[9], 包括引言 B (Bridge-in)、目标 O (Objective)、前测 P (Pre-assessment)、参与式学习 P (Participatory Learning)、后测 P (Post-assessment)和总结 S (Summary)。该教学模型强调以学生为中心、以目标为导向、师生参与互动式学习。BOPPPS 模型以其结构化、参与式的设计逻辑, 获得了世界多所高校的青睐。本文将 BOPPPS 教学方法应用于本科生“高功率微波天线测量”实验教学中, 以提高学生学习的积极性与主动性, 提升教学质量, 为本科实验教学改革提供借鉴和参考。

2. 高功率微波天线测量教学内容

2.1. 方向图测量

近场法是在被测天线(Antenna Under Test, 简称 AUT)的辐射近场区, 用一个已知电特性的探头, 扫描抽测一个平面或曲面上天线近场的幅相分布, 然后通过严格的数学变换确定天线的方向图的方法。近场测试装置主要包括: 扫描架、矢量网络分析仪、高频稳幅稳相射频电缆、波导探头、射频功率放大器、

定向耦合器、衰减器、测控计算机、扫描架控制软件、测试数据采集软件和微波暗室等组成，其系统组成如图 1 所示。

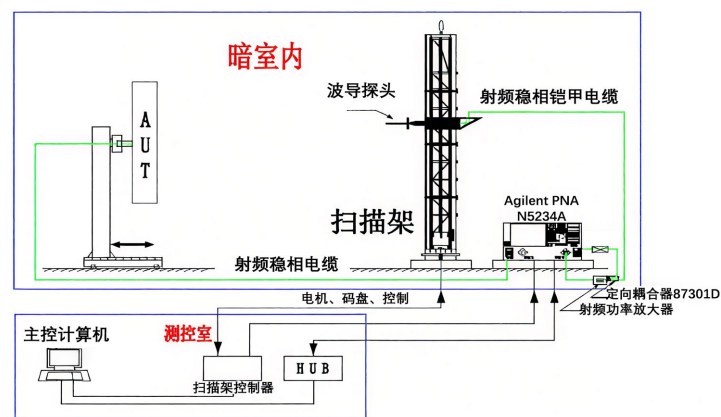


Figure 1. Experimental setup of antenna radiation pattern measurement by using near-field method
图 1. 近场法测量天线方向图的系统组成

近场法测量天线方向图的过程为：矢量网络分析仪的两个测试端口分别作为输入和输出端，其输出端通过射频稳相电缆与待测天线连接，待测天线以连续波的形式发射信号。在 主控计算机的控制下，扫描架上的波导探头，以一定的扫描方式对待测天线发射的射频信号进行接收采样，并通过定向耦合器、射频功率放大器以及射频稳相电缆输入到矢量网络分析仪的输入端。数据采集计算机通过 GPIB 卡及 GPIB 电缆与矢量网络分析仪通讯并存储测试数据。测试过程中，扫描系统每到采样时输出 TTL 触发电平给矢量网络分析仪外触发端口，以保持仪表采样同步，其测量链路如图 2 所示，实验测试布局如图 3 所示。测量结束后，利用数据处理软件对天线阵面的近场特性进行分析，并计算得到天线的方向图。为保证测量的准确性，需要保证波导探头与待测天线的口面平行，并且极化方向一致。一般波导探头到待测天线的距离为 $3\sim 5\lambda$ ，采样间隔小于 $\lambda/2$ ，其中 λ 为待测天线的工作波长。

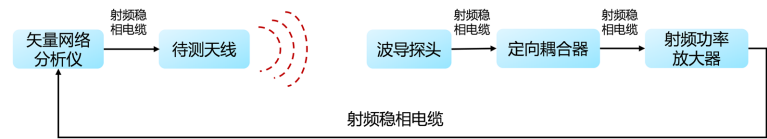


Figure 2. Composition of measurement link in near field measurement method
图 2. 近场法测量链路组成

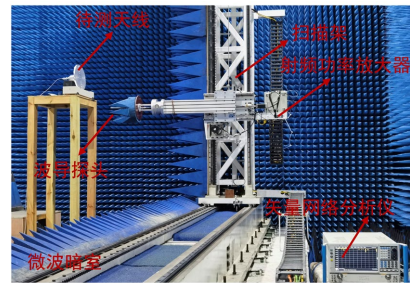


Figure 3. Experimental setup of the near field measurement method
图 3. 近场法测量天线方向图的实验布局

2.2. 增益测量

天线增益的测量采用比较法，其实质是将待测天线的增益与已知天线的增益进行比较而得出待测天线的增益。测量过程如图 4 所示，将待测天线接入测量系统中，可以得到经过传输和接收后系统的传输系数 S_{21} ，然后将待测天线换为标准增益天线，可以测得此时经过传输和接收后系统的传输系数 S'_{21} ，对比两次的测量结果，根据已知标准增益天线的增益计算出待测天线的增益。其计算公式为：

$$\begin{cases} G_{\text{标准}} + \alpha_{\text{空气}} + \alpha_{\text{线缆}} + G_{\text{接收}} = S_{21} \\ G_{\text{待测}} + \alpha_{\text{空气}} + \alpha_{\text{线缆}} + G_{\text{接收}} = S'_{21} \end{cases} \quad (1)$$

$$G_{\text{待测}} = G_{\text{标准}} + (S'_{21} - S_{21}) \quad (2)$$

式中 $G_{\text{待测}}$ 为待测天线的增益， $G_{\text{标准}}$ 为标准增益天线的增益， $\alpha_{\text{线缆}}$ 为线缆的衰减， $\alpha_{\text{空气}}$ 为空气的衰减。

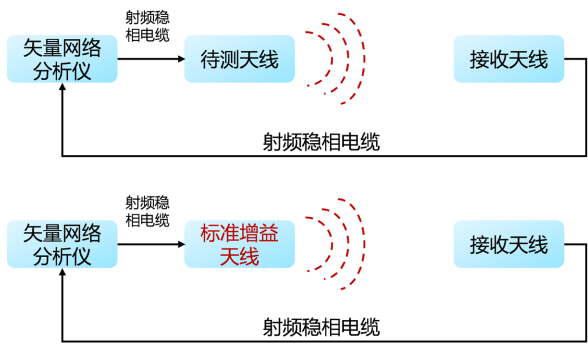


Figure 4. Principle of comparative method for measuring antenna gain
图 4. 比较法测量天线增益原理

2.3. 功率容量测量

在完成天线方向图和增益的测试后，将待测天线与高功率微波源连接，在距离天线 8 m 处放置接收喇叭，用来接收待测天线辐射的高功率微波，测试布局如图 5 所示。改变高功率微波源的输出功率，记录接收喇叭检测到的微波波形，并与微波源的固有波形进行对比，当出现明显的脉冲缩短时，说明待测天线击穿，则其功率容量为此时微波源的输出功率。由于天线功率容量测量实验需要操作高电压、大电流、强辐射设备，为保障学员安全，在实验前需要进行专门的操作安全培训，在实验过程中学员在远离高功率微波装置的屏蔽室内操作，避免强电磁辐射。

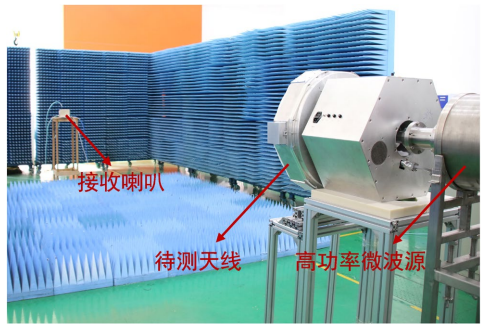


Figure 5. Experimental setup of the antenna power handling capacity
图 5. 天线功率容量测试实验布局

3. BOPPPS 模型的实验教学实施路径

高功率微波天线测量实验课程总共 90 分钟，下面将分别从引言、目标、前测、参与式学习、后测、总结六个环节对高功率微波天线测量实验课程进行教学设计。

3.1. 导入

导入的目的是激发学生学习兴趣，建立学习情境，通过情境化激发实验动机。为了更好地吸引学生的注意，本实验从三个方面入手。首先是工程案例的引入，播放一小段美军高功率微波武器的演示视频，让学生能够关注到高功率微波天线在高功率微波武器中的作用。视频结束后，要求学生列举高功率微波天线的特点，并与常规微波天线进行对比。接着展示不同类型天线实物(如抛物面天线、阵列天线、透镜天线)，对学生产生视觉冲击，让学生观察其结构差异，思考测量方法的特殊性，并引出高功率微波天线测量的核心技术指标，如方向图、增益和功率容量等。最后设置本次课程的悬念，提前告知学生实验中可能遇到的挑战，让学生思考圆极化天线和线极化天线方向图测量的区别，引发学生探究欲望。

高功率微波一个重要应用方向是高功率微波武器，通过工程案例引入、实物演示冲击、悬念设置等方法引起学生的好奇心与学习兴趣，将学生的注意力紧紧锁定在课堂；同时，通过启发讨论的方式让学生自主思考天线测量的方法，并过渡到本次课的学习内容，使学生心存疑问，带着求知欲望进行学习。

3.2. 目标

目标指让学生明确学习目标与预期成果，可为学生提供学习指引，让学生聚焦核心问题，提高学习效率。这次实验课程的目标主要包含三层：

- 1) 认知目标：能阐述高功率微波天线方向图、增益和功率容量等特性参数的物理含义和测量原理；
- 2) 技能目标：能够独立操作矢量网络分析仪、天线近场测量扫描装置。能够独立完成待测天线方向图、增益和功率容量的测量；
- 3) 能力目标：通过小组协作分析测量数据，提出测量误差优化方案。

3.3. 前测

前测是有效开展教学活动的重要前提，目标在于评估学生现有知识水平。本次课程从双维度开展测评，诊断学生的知识缺口。首先是在理论基础方面，采用闭卷测试的方法了解学生的预习效果和可能面临的困难。典型问题示例有“天线方向图的物理含义是什么？”、“天线增益的物理含义是什么？”、“天线的远场条件怎么计算？”、“圆极化天线和线极化天线的区别？”等。根据学生的知识基础，可以适当调整问题的难度与深度。其次是针对实操认知方面进行测试，通过 PPT 互动答题，典型问题示例有“如何正确连接微波源与待测天线？”，“如何保证待测天线和波导探头对准”、“在利用比较法测增益时需要保证哪些变量不变”等等，引导学生更加深入地对实验过程进行思考，培养其解决实际问题的能力。同时根据前测结果调整实验指导重点，使授课更具针对性。

3.4. 参与式学习

参与式学习指打破“教师主讲”模式，通过互动让学生主动建构知识体系，是 BOPPPS 教学模型的核心环节。参与式学习强调以学生为中心，突出学生学习的主动性。在这一环节中，分三个层次开展。首先是基础层，将学员按 4 人一组进行分组，轮流担任“操作员”、“记录员”、“质控员”、“汇报员”，完成天线安装、参数设置、数据采集和结果判读。其次是进阶层，教师设置干扰项，如在比较法测量增益时故意改变标准增益天线口面到波导探头的距离，让学生思考可能导致的后果，加深学员对于比

较法内涵的深度理解。还如设置下列问题让小组开展讨论：“待测天线和波导探头能否收发交换”、“扫描架纵向采样和横向采样哪个精度更高”、“极化未对准对于天线测试结果的影响”等等。在讨论中，充分启发学生对高功率微波天线每个测量环节的思考，培养学生的批判性思维，鼓励学生提出更为合理精确的测量思路。最后是创新层次，让学员根据不同型号天线(如径向线缝隙天线、螺旋阵列天线)设计实验流程，对测量方案进行优化，从而降低测量误差，提升测量精度。

图6显示了以学生为主测量得到的天线方向图，让学生对测量得到的方向图进行分析，通过学生自身的参与式学习，深化学生对方向性系数、波束宽度、旁瓣电平、波束指向等指标物理意义的理解，提升授课效果。

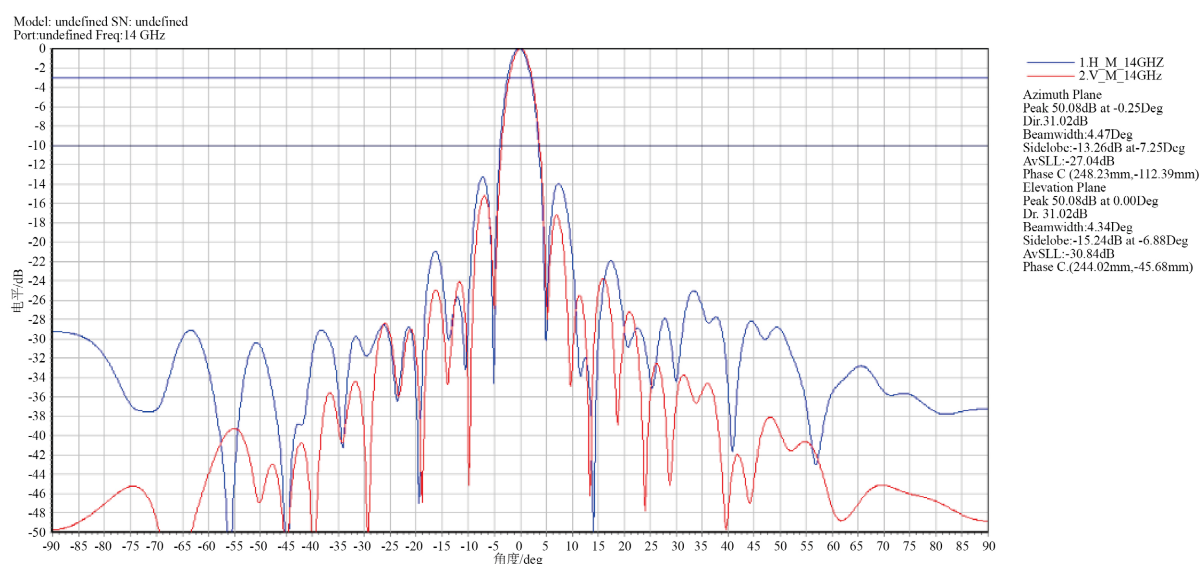


Figure 6. Measured radiation pattern of the high-power microwave antenna

图6. 测量得到的方向图

3.5. 后测

后测是检验学生是否达成学习目标，与前测形成对比。教师根据评估结果，可以进行教学反思，促进教学设计、改进与完善，提高教学质量。对于高功率微波天线测量实验课程，后测环节从三个维度对学员的学习效果进行检验。首先是操作规范性方面，通过监控视频回放，检验学生对测量步骤、测量方法以及测量细节的掌握情况，评估设备操作错误率(如电缆连接是否符合微波测量规范)；其次是数据质量方面：分析实验报告中误差分析的深度(如是否使用统计学方法处理数据)；最后是问题解决能力方面：设置突发故障(如“扫描架扫描突然中断”)，观察学生排查故障，解决问题的动手能力。

此外，后测环节也可以设置下列问题，引导学生对于本实验进行深层次思考，加深学生对理论知识的理解：

- 1) 改变待测天线到波导探头的距离是否会影响天线方向图的测量结果？
- 2) 采样间隔对于天线方向图测量精度有何影响？
- 3) 绝对值法测量天线增益与比较法测量天线增益哪个更准确？

3.6. 总结

总结旨在梳理知识脉络，强化记忆，衔接后续学习，起着承前启后的作用。实验结束后，首先对本

次实验课程的主要内容进行总结,其次,根据学生参与式学习以及后测环节的学习效果,对易错知识点进行强调与纠正。最后,布置开放式任务:“查阅文献,分析远场法测量天线方向图与近场法的差异”,培养学生的辩证思维,提升其总结归纳能力。

4. 结语

高功率微波天线测量是物理电子学专业的本科生实验课程,将 BOPPPS 模型引入“高功率微波天线测量”实验教学,通过导入情境化、目标可视化、学习参与化、评价多维化的设计,有效解决了传统实验课“重操作、轻思维”的问题。该模式不仅提升了学生的实验技能与科研素养,更为工科实验教学的创新提供了可复制的范式——即通过结构化教学设计,将“知识传递”转化为“知识建构”,让实验课堂成为培养工程思维的重要载体。但由于授课时间的限制,该教学方法还存在一定的局限性,如果在实验前能够让学生先通过虚拟仿真的方法进行操作,将更有助于学生掌握实验机理和实验方法,这也是本实验课下一步的重点改进方向。

参考文献

- [1] Barker, R.J. and Schamiloglu, E. (2001) High-Power Microwave Sources and Technologies. Wiley-IEEE Press, 2001: 1-8.
- [2] Benford, J., Swegle, J.A., Schamiloglu, E. 高功率微波[M]. 第 2 版. 江伟华, 张弛, 译. 北京: 国防工业出版社, 2008: 2-12.
- [3] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. 高功率微波[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 68-124.
- [4] 曹丹平, 印兴耀. 加拿大 BOPPPS 教学模式及其对高等教育改革的启示[J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 196-200.
- [5] 朱莉, 高向军, 张厚, 王亚伟. BOPPPS 教学模式下“微波技术与天线”课程改革探索[J]. 创新教育研究, 2020, 8(6): 896-902.
- [6] 党方超, 孙云飞. BOPPPS 模型在研究生实验课程高功率微波测量中的应用研究[J]. 创新教育研究, 2021, 9(5): 1209-1214.
- [7] 吴昌东, 江桦, 陈永强. BOPPPS 教学法在 MOOC 教学设计中的研究与应用[J]. 实验技术与管理, 2019(2): 218-222.
- [8] 王之元, 周云, 彭学锋, 等. BOPPPS 模型在《信号分析与处理》课堂教学的应用[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(S1): 68-71.
- [9] 张建勋, 朱琳. 基于 BOPPPS 模型的有效课堂教学设计[J]. 职业技术教育, 2016, 37(11): 25-28.