



圆极化电磁波的理论教学与实验设计

刘贤峰, 杨德强, 陈 波, 潘 锦

(电子科技大学 电子科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对电磁场教学中极化概念抽象, 学生理解困难的突出特点, 该文结合电磁波圆极化理论的教学构思, 配套设计了圆极化教学新实验。实验利用轴向模螺旋天线易于观察旋向的特点, 制作了简易的左旋和右旋圆极化螺旋天线, 并配合电磁波综合实验仪进行收发和观测。该教学方法将电磁波圆极化理论的教学与实验相结合, 以逻辑清晰、形象直观的形式帮助学生学习和充分理解电磁波极化中的教学难点。该文设计的圆极化教学新实验填补了电磁波圆极化教学实验的空白。

关键词: 极化理论; 教学模式; 圆极化; 新实验

中图分类号: G424.31

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20200466](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20200466)

Theoretical Teaching and Experimental Design of Circularly Polarized Electromagnetic Waves

LIU Xianfeng, YANG Deqiang, CHEN Bo, PAN Jin

(School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Considering that the concept of polarization in electromagnetic field course is abstract and difficult for students to understand, this paper designs a new experiment of circular polarization in combination with the teaching idea of electromagnetic wave circular polarization theory. The experiment made use of the characteristic that the axial mode helical antenna is easy to observe the rotation direction, and made simple left-handed and right-handed circular polarized antennas. Combined with electromagnetic wave comprehensive experiment instrument for transceiver and observation. This teaching method combines the teaching of electromagnetic wave circular polarization theory with experiment, and helps students to learn and fully understand the difficulty of electromagnetic wave polarization in a clear and visual form. The new experiment of circular polarization teaching designed in this paper fills the blank of electromagnetic wave circular polarization teaching experiment.

Key words: polarization theory; teaching model; circular polarization; new experiments

极化通常用于工程抗干扰, 以达到最佳的信号传输和接收, 在雷达技术上有广泛的应用。其中, 圆极化电磁波又以其独特的性质, 在空地通信、电子对抗、天文等现代设备中, 愈来愈多地被采用^[1]。由于极化匹配程度对系统性能的影响是直接和显著的, 因此在教学中更好地认识和体验电磁波的圆极化对学生今后的工程应用具有指导意义。然而, 由于电磁波抽象、难理解的特点, 学生很难通过课堂教学直观、形象地理解圆极化旋向的概念和极化匹配的重要性。

目前, 许多高校开展了关于极化的教学和实验研究, 已开展的极化教学实验研究多采用计算

机仿真^[2-4]和开展演示实验^[5-7], 这些方法缺乏对学生工程实践能力的培养; 文献 [8] 提出了一种适合学生自己动手设计和制作的低成本圆极化天线, 但不能用于帮助学生理解圆极化旋向和极化匹配。

近十年来, 电子科技大学开发了大量电磁场与波的新实验, 设计的电磁波教学综合实验仪等实验平台已获得多所高校的推广使用^[9-11]。然而, 这些实验平台仍不能满足让学生自己动手开展圆极化电磁波教学实验的需求。

创新设计的轴向模螺旋天线圆极化实验填补了电磁波圆极化教学实验方法的空白, 在近两年

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(61721001)。

作者简介: 刘贤峰(1977-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电磁场与微波技术方面的研究。

的电磁场与波课程教学实践中进行了试验、调整、完善,已取得了显著的教学效果。

1 电磁波极化

电磁波是在空间传播的电磁场,它的其中一个特征可以通过在固定位置观察电磁场的时间变化规律得以反映,按这样方式展开的分类研究即是讨论电磁波的极化问题,极化是电磁理论中的一个重要概念。

研究固定位置点电场矢量 $\mathbf{E}(\mathbf{r} = \mathbf{r}_0, t)$ 随时间的变化规律,需考虑包括其大小和方向两个方面的变化情况。为简化分析,可用一条有向线段表示该电场矢量。由此,电场大小和方向的变化仅表现为该有向线段的矢端在选定坐标系中的位置变化。按矢端随时间变化画出来的轨迹图形分类,可分为线极化、圆极化和椭圆极化,其中轨迹形状为圆的即是圆极化;按矢端随时间变化的运动旋向分类,可分为左旋极化和右旋极化。工程上对于旋向的判断,约定以波的传播方向为参考,符合右手螺旋方向的称为右旋极化,符合左手螺旋方向的称为左旋极化。当电波的极化方向与接收天线的极化方向一致,即极化匹配时,天线的响应最好^[12]。这样,电场的任意时间变化情况,可通过在所选坐标系中的电场矢端轨迹曲线和运动方向全面表达。

2 圆极化理论教学设计

在圆极化理论教学设计中,知识点的结构和层次设计是先系统阐述圆极化波产生的条件,其次给出圆极化波旋向的分类及其判断方法,最后结合实际引入圆极化中一个重要参数——极化隔离度,用于后续实验分析。

2.1 圆极化波的产生条件

对于时谐场,由于时空变化的自变量可以分离,即其时空变化规律可独立研究,因此,研究时间变化的规律时,可取 $\mathbf{r}_0$ 为任意值而不影响问题的一般性,我们选取 $\mathbf{r}_0 = 0$ 处分析电磁波的极化。

同时,为进一步简化分析,选取直角坐标系的 z 轴为电磁波传播方向,考虑任何均匀平面波的电场矢量都可以分解成两个正交的矢量^[13]。如图1所示,一个波的极化取向在水平 x 方向,称为水平极化波;另一个波的极化取向在垂直 y 方向,称为垂直极化波,即:

$$\mathbf{E}(0, t) = \mathbf{e}_x E_x(0, t) + \mathbf{e}_y E_y(0, t) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} E_x(0, t) = E_{xm} \cos(\omega t + \phi_x) \\ E_y(0, t) = E_{ym} \cos(\omega t + \phi_y) \end{cases}$$

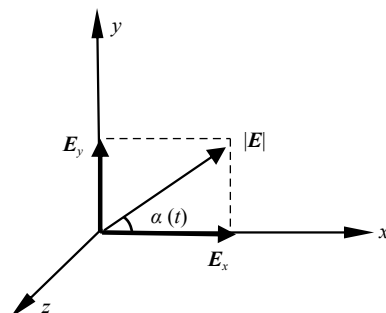


图1 圆极化波的线极化分量

$|\mathbf{E}(0, t)|$ 表示合成波电场的振幅, $\alpha(0, t)$ 表示合成波电场与 x 轴的夹角,显然根据极坐标轨迹方程,电磁波的旋向可由 $\alpha(0, t)$ 时间变化率的正负结果获知:

$$|\mathbf{E}(0, t)| = \sqrt{E_{xm}^2 \cos^2(\omega t + \phi_x) + E_{ym}^2 \cos^2(\omega t + \phi_y)}$$

$$\alpha(0, t) = \arctan \left[\frac{E_{ym} \cos(\omega t + \phi_y)}{E_{xm} \cos(\omega t + \phi_x)} \right]$$

特殊的,当 $E_{xm} = E_{ym} = E_m$, $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm\pi/2$ 时,合成波电场的振幅及其合成波电场与 x 轴的夹角分别为:

$$|\mathbf{E}(0, t)| = E_m$$

$$\alpha = \arctan[\pm \tan(\omega t + \phi_x)] = \pm(\omega t + \phi_x)$$

此时合成波电场的振幅是定值,电场的方向与 x 轴的夹角随时间变化,电场矢量端点的运动轨迹形状为圆,合成波为圆极化波。

2.2 圆极化波旋向的分类及其判断方法

1) 当 $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\pi/2$ 时, $\alpha = \omega t + \phi_x$, $\frac{d\alpha}{dt} = \omega$, 即随着时间变化,电场与 x 轴的夹角 α 逐渐增大。以波的传播方向为参考,符合右手螺旋方向,此时为右旋圆极化波。

2) 当 $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pi/2$ 时, $\alpha = -(\omega t + \phi_x)$, $\frac{d\alpha}{dt} = -\omega$, 即随着时间变化,电场与 x 轴的夹角 α 逐渐减小。以波的传播方向为参考,符合左手螺旋方向,此时为左旋圆极化波。

由此可见,旋向由电场分量的初相差决定,是朝初相滞后的电场分量方向旋转的。

2.3 极化隔离度

在圆极化天线的实际使用中,由于结构等原因,会发射或接收与预定极化旋转方向相反的极

化分量, 这种不需要的辐射极化分量称为交叉极化。两种极化的耦合程度可以用极化隔离度描述为:

$$I = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2)$$

式中, P_1 代表主极化的功率, P_2 代表交叉极化的功率。可见, 当 I 大于 3 dB 时, 主极化功率是交叉极化功率的 2 倍以上。

3 圆极化实验方法设计

3.1 螺旋天线

螺旋天线由两部分构成, 如图 2 所示, 底部是反射板, 上部是绕成螺旋线形状的金属导体。图中 D 为螺旋的直径, h 为螺距, l 为螺旋天线的轴向长度, c 是螺旋一圈的周长, Δ 是螺距角, n 是螺旋圈数。各参数之间满足^[14]:

$$\begin{cases} c^2 = (\pi D)^2 + h^2 \\ \Delta = \tan^{-1} \frac{h}{\pi D} \\ l = nh \end{cases} \quad (3)$$

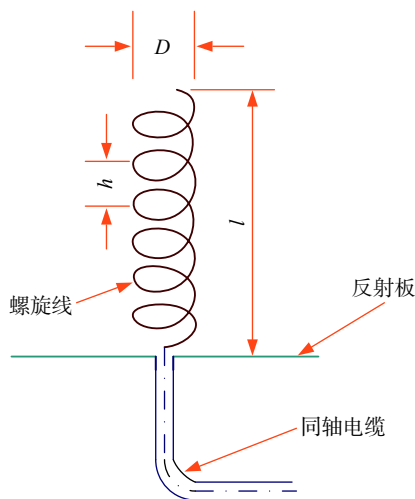


图 2 螺旋天线

螺旋天线的辐射模式与 D/λ 的比值密切相关。

1) 法向模式($D/\lambda < 0.18$): 最大辐射方向在垂直螺旋轴线的平面内, 水平面方向图为一个圆, 垂直面方向图为 8 字形(图 3(a)), 对应天线为法向(模)螺旋天线。

2) 轴向模式($D/\lambda \approx 0.25 \sim 0.46$): 此时螺旋一圈的周长约为一个波长, 最大辐射方向沿螺旋轴线方向(图 3(b)), 对应天线为轴向(模)螺旋天线。

3) 圆锥模式($D/\lambda > 0.46$): 天线的最大辐射方向偏离螺旋轴线(图 3(c))。

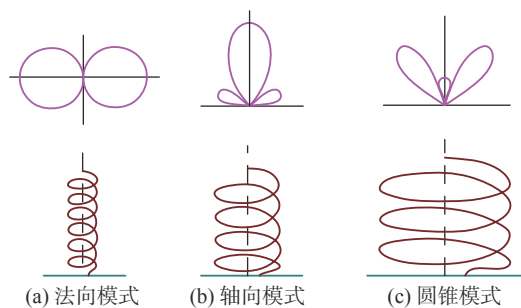


图 3 螺旋天线的 D/λ 对方向图的影响

实验表明, 当螺旋天线的周长接近一个波长时, 其轴向场接近行波, 且辐射圆极化波。本实验选择这种天线形式, 实验过程中, 学生使用直径 1 mm 的铜丝绕制轴向模螺旋天线。信号源工作频率为 1 GHz, 螺旋直径约取 9.4 cm, 螺距约 5.3 cm, 以波的传播方向为参考, 铜丝顺时针绕向为左旋, 逆时针绕向为右旋。

3.2 四极化发射天线

测试用电磁波的产生, 由电磁波教学综合实验仪输出一定功率的信号, 通过天线的能量转换作用将高频电流能量转换为自由空间的电磁能量, 并定向辐射出去, 提供给极化实验使用。这里发射电磁波的天线是一种专门设计的四极化微带天线, 内部采用了巧妙设计的馈电网络。如图 4 所示, 四极化发射天线背面有 4 个输入端口, 分别标注为 A、B、C、D, 从不同端口输入信号, 天线分别可以产生垂直极化波、水平极化波、左旋圆极化波和右旋圆极化波。当选择其中一个端口发射时, 其余 3 个端口必须要连接匹配负载。学生实验时, 可以根据实验项目的要求, 选择发射其中一种极化波, 用于自制天线的测试。

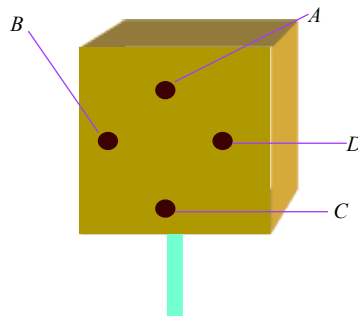


图 4 四极化发射天线

3.3 接收检测方法设计

3.3.1 电流表检测

传统电流表检测是一种稳定可靠的微波信号强度检测方式, 实验的接收电路框图如图 5 所

示,螺旋天线收到的微波信号,经过微波检波器变成直流电流,再由电流表显示信号强度的大小。实验前,为学生准备好直径 100 mm 圆形金属铝制作的地板,地板上安装好 SMA 插座,内导体穿过铝板形成 5 mm 长的探针,学生用铜丝制作好圆极化天线后,将铜丝一头焊接在探针上,构成带反射板的轴向模螺旋天线。

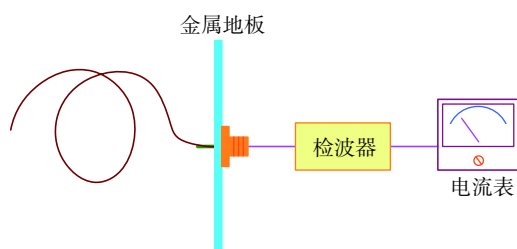


图5 圆极化天线接收电流表检测示意图

使用电流表读数的检测精度较高,除了可以通过电流大小判断圆极化的旋向,也可以通过相同位置两种极化的不同接收电流大小,计算极化隔离度。还可按传输轴线转动 360°接收,测得极化图,从而读取极化轴比和倾角等参数。

3.3.2 白炽灯检测

这里重点介绍一种更加简便易行,且更有趣味性的实验方式,即采用小功率白炽灯代替电流表。螺旋天线制作中省略了反射板,采用了人手替代的检测方法。如图6所示,是手持方式测试圆极化天线的示意图。实验前,为学生准备好焊接有小功率白炽灯灯泡的小电路板,学生将用铜丝自行设计并制作好螺旋天线,将铜丝一头用螺丝压接在小灯板一端上。测试时学生手持小灯板另一端的金属部分,将螺旋天线对准来波方向,天线感应到相同极化旋向的电磁波,转换为高频电流,流过小灯板使白炽灯灯泡发光,然后通过人体导电作用,经手部将电荷传递到远处的大地形成回路。

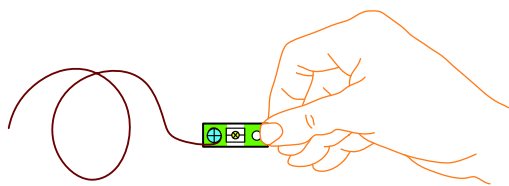


图6 圆极化天线手持测试方式示意图

4 实验结果验证

传统电流表检测的圆极化实验方式这里不再

详细描述。只针对白炽灯检测的实验方式进行验证。

白炽灯检测圆极化实验的具体操作有如下4个步骤。

1) 用C端口发射,用自制的左旋和右旋天线测量可以点亮灯泡的最远接收距离。

2) 用D端口发射,用自制的左旋和右旋天线测量接收距离,按照电场强度与距离成反比关系,计算左/右旋的隔离度。

3) 重复以上两步,设法获得多组数据,求出平均值的结果。

4) 用制作的左旋、右旋圆极化天线,判断C端口和D端口圆极化波的旋向(左旋圆极化、右旋圆极化)。

根据表1的数据,用C端口发射,极化隔离度为:

$$I_{av} = \frac{I_1 + I_3 + I_5}{3} = 5.17 \text{ (dB)} \quad (4)$$

表1 测试数据

发射端口	距离/cm		隔离度/dB
	左旋	右旋	
C端口	31.5	46.5	3.38
D端口	57.0	44.5	2.15
C端口	27.5	53.5	5.78
D端口	53.0	29.0	5.24
C端口	27.0	56.0	6.34
D端口	47.0	25.0	5.48

用D端口发射,极化隔离度为:

$$I_{av} = \frac{I_2 + I_4 + I_6}{3} = 4.29 \text{ (dB)}$$

据此可判断出,C端口发射右旋圆极化波,D端口发射的是左旋圆极化波。

5 结束语

本文使用简单的材料和普及的实验平台开展电磁波圆极化实验,通过测量小功率白炽灯点亮的距离,帮助学生形象、直观地认识极化的概念和匹配的重要性,加深对极化理论的理解。该教学方法把抽象的理论知识形象化,有效地促进了电磁场课程极化知识点的掌握,为进一步学习微波技术与天线等课程知识以及电磁波在通信技术的应用打下坚实的基础。

(下转第 50 页)