

电磁场与电磁波实验 指导书

刘万强 主编

山东理工大学电气与电子工程学院

电磁场与电磁波实验室

2020.10

电磁场与电磁波实验守则

1、学生必须按时到指定实验室做实验，不迟到、不早退，不喧哗，不乱扔杂物；爱护公物，严禁在实验桌面上乱刻、乱画。保持实验室良好的实验环境。

2、实验前学生必须对所做的实验进行充分预习，并写出预习报告。实验前应认真了解所用仪器、设备、仪表的使用方法与注意事项。在启动设备之前，需经指导教师检查认可。

3、实验时，要严肃认真，正确操作，仔细观察，真实记录实验数据的结果。实验中严禁违章操作，遇到仪器设备故障要及时报告，不得自行拆卸。不得做与实验无关的事情，不得动与实验无关的设备，不得进入与实验无关的场所。

4、实验中，如发现仪器设备损坏或丢失，应及时报告，查明原因。凡属违反操作规程导致设备损坏或自行丢失仪表工具的，要追究责任，照章赔偿。

5、若发生事故，不要惊慌，必须立即切断电源，要保持现场并报告老师，以便查明情况，酌情处理。

6、实验完毕后，要按要求整理好试验设备、器材和工具等，关断电源。经指导教师检查数据并签字后，方可离开实验室。

7、学生需做开放性实验时，应事先与有关实验室（中心）联系，报告自己的实验目的、内容。实验结束后应整理好实验现场。

8、学生必须认真做好实验报告，在规定时间内交给指导教师批阅。

目 录

实验一	电磁波感应器的设计与制作	3
实验二	电磁波传播特性实验	7
实验三	电磁波的极化实验	10
实验四	天线方向图测量实验	13
附 录	实验演示视频	17

实验一 电磁波感应器的设计与制作

一、预习要求

- 1、什么是法拉第电磁感应定律？
- 2、什么是电偶极子？
- 3、了解线天线基本结构及其特性。

二、实验目的

- 1、认识时变电磁场，理解电磁感应的原理和作用。
- 2、通过电磁感应装置的设计，初步了解天线的特性及基本结构。
- 3、理解电磁波辐射原理。

三、实验原理

随时间变化的电场要在空间产生磁场；同样，随时间变化的磁场也要在空间产生电场。电场和磁场构成了统一电磁场的两个不可分割的部分。能够辐射电磁波的装置称为天线，用功率信号发生器作为发射源，通过发射天线产生电磁波。

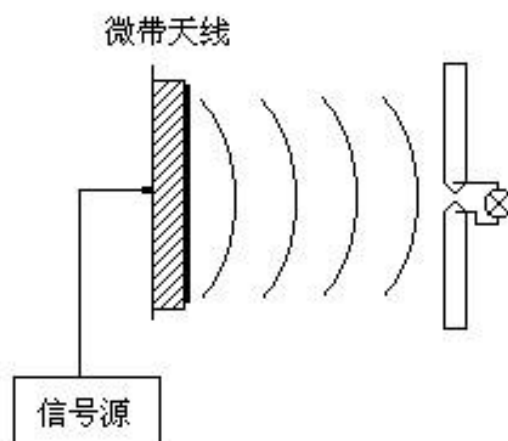


图1 电磁感应装置

如果将另一付天线置于电磁波中，就能在天线体上感生高频电流，我们可以称之为接收天线，接收天线离发射天线越近，电磁波功率越强，感应电动势越大。如果用小功率的白炽灯泡接入天线馈电点，能量足够时就可使白炽灯发光。接收天线和白炽灯构成一个完整的电磁感应装置，如图1所示。

电偶极子是一种基本的辐射单元，它是一段长度远小于波长的直线电流元，线上的电流均匀同相，一个作时谐振荡的电流元可以辐射电磁波，故又称为元天线，元天线是最基本的天线。电磁感应装置的接收天线可采用多种天线形式，相对而言性能优良，但又容易制作、成本低廉的有：半波天线、环形天线、螺旋天线等，如图2所示。

本实验重点介绍其中的一种——半波天线。

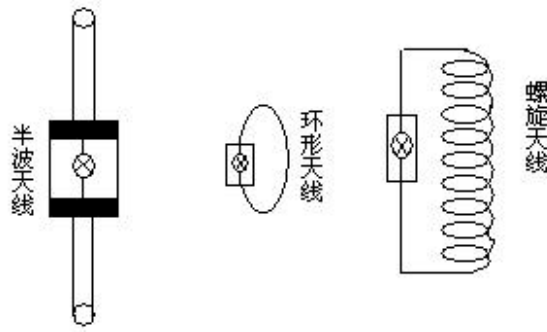


图2 接收天线

半波天线又称半波振子，是对称天线的一种最简单的模式。对称天线（或称对称振子）可以看成是由一段末端开路的双线传输线形成的。这种天线是最通用的天线型式之一，又称为偶极子天线。而半波天线是对称天线中应用最为广泛的一种天线，它具有结构简单和馈电方便等优点。

半波振子因其一臂长度为 $\lambda/4$ ，全长为半波长而得名。其辐射场可由两根单线驻波天线的辐射场相加得到，于是可得半波振子（ $L = \lambda/4$ ）的远区场强有以下关系式：

$$|E| = \frac{60I}{r} \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta} = \frac{60I}{r} f(\theta)$$

式中， $f(\theta)$ 为方向性函数，对称振子归一化方向性函数为：

$$|F(\theta)| = \frac{|f(\theta)|}{f_{\max}} = \frac{\cos(\frac{\pi}{2} \cos \theta)}{\sin \theta}$$

其中 f_{\max} 是 $f(\theta)$ 的最大值。

由上式可画出半波振子的方向图如图3所示。

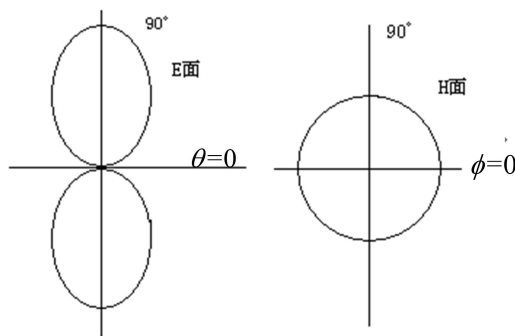


图3 半波振子的方向图

半波振子方向函数与 ϕ 无关，故在 H 面上的方向图是以振子为中心的一个圆，即为全方向性的方向图。在 E 面的方向图为 8 字形，最大辐射方向为 $\theta = \pi/2$ ，且只要一臂长度不超过 0.625λ ，辐射的最大值始终在 $\theta = \pi/2$ 方向上；若继续增大 L，辐射的最大方向将偏离 $\theta = \pi/2$ 方向。

四、实验内容与步骤

1、打开功率信号发生器电源开关，Signal 信号灯亮，说明机器工作正常。按下 Tx 按钮，观察功率指示表有一定偏转，此时 Standby 待机灯亮，说明发射正常。将电缆线连接到发射天线的水平线极化端口（最左端接口），其余端口用铜帽封闭。

2、用金属丝制作天线体，用螺丝固定于感应灯板（或电流表检波板）两端，并安放到测试支架上，调节感应板的角度，使其与发射天线的极化方向一致。调节测试支架滑块到最右端，按下功率信号发生器上 Tx 按钮，同时移动测试支架滑块，靠近发射天线，直到小灯刚刚发光时，记录下滑块与发射天线的距离。

3、改变天线振子的长度，重复步骤 2，记录数据填入下表。

4、选用其它天线形式制作感应器，重复步骤 2，记录数据填入表 1。

表 1 接收天线数据测量

次数	天线形式	天线长度	接收距离
1			
2			
3			
4			

五、注意事项

1、按下 Tx 按钮时，若红色告警灯亮，应立即停止发射，检查电缆线与发射天线端口是否旋紧，其余端口是否用封闭帽盖上，输出接口与电缆是否接好，避免损坏机器。

2、测试白炽灯感应器时，不能将感应灯靠近发射天线的距离太小，否则会烧毁感应灯。（置于 20cm 以外，或视感应灯亮度而定）。

3、尽量减少按下 Tx 按钮的时间，以免影响其它小组的测试准确性。

4、测试时尽量避免人员走动，以免人体反射影响测试结果。

六、报告要求

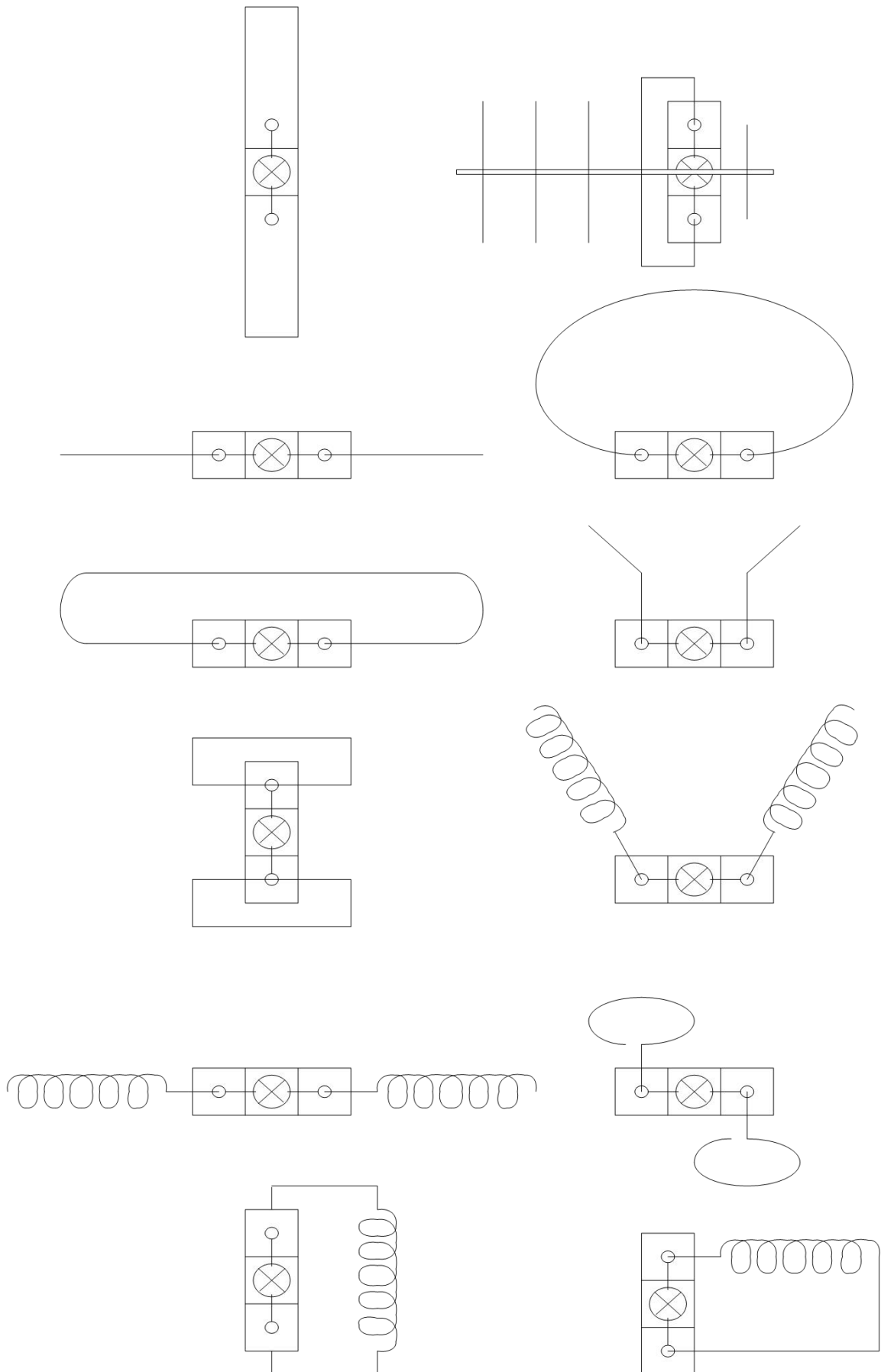
1、制作两种以上天线（每种天线用不同导线长度），观察接收效果。画出天线形状，测量天线长度，记录接收距离。

2、对实验中的现象分析讨论，哪种天线形式接收效果最好？

3、简述常用电子设备的工作原理，如校园卡、公交卡、微波炉、电磁炉、手机等。

4、按照标准实验报告的格式和内容完成实验报告，按签名单序号排序，一周内收齐交到实验办公室。

七、接收天线参考形状



实验二 电磁波传播特性实验

一、预习要求

- 1、什么是迈克尔逊干涉原理？它在实验中有哪些应用？
- 2、驻波的产生原理及其特性。

二、实验目的

- 1、学习了解电磁波的空间传播特性。
- 2、通过对电磁波波长、波幅、波节、驻波的测量，进一步认识和了解电磁波。

三、实验原理

变化的电场和磁场在空间的传播称为电磁波。几列不同频率的电磁波在同一媒质中传播时，几列波可以保持各自的特点（波长、波幅、频率、传播方向等），在同时通过媒质时，在几列波相遇或叠加的区域内，任一点的振动为各个波单独在该点产生振动的合成。而当两个频率相同、振动方向相同、相位差恒定的波源所发出的波叠加时，在空间总会有一些点振动始终加强，而另一些点振动始终减弱或完全抵消，因而形成干涉现象。这也称为迈克尔逊干涉原理。

干涉是电磁波的一个重要特性，利用干涉原理可对电磁波传播特性进行很好的探索。而驻波是干涉的特例。在同一媒质中两列振幅相同的相干波，在同一直线上反向传播时就叠加形成驻波。

由发射天线发射出的电磁波，在空间传播过程中可以近似看成均匀平面波。此平面波垂直入射到金属板，被金属板反射回来，到达电磁波感应器；直射波也可直接到达电磁波感应器，这两列波将形成驻波，两列电磁波的波程差满足一定关系时，在感应器位置可以产生波腹或波节。

设到达电磁感应器的两列平面波的振幅相同，只是因波程不同而有一定的相位差，电场可表示为：

$$E_x = E_m \cos(\omega t - kz)$$

$$E_y = E_m \cos(\omega t + kz + \delta)$$

其中 $\delta = \beta z$ 是因波程差而造成的相位差。

则当相位差 $\delta = \beta z_1 = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 时，合成波的振幅最小， z_1 的位置为合成波的波节；相位差 $\delta = \beta z_2 = (2n+1)\pi/2$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 时，合成波的振幅最大， z_2 的位置为合成波的波腹。

实际上到达电磁感应器的两列波的振幅不可能完全相同，故合成波波腹振幅值不是二倍单列波的振幅值，合成波的波节值也不是恰好为零。

根据以上分析，若固定感应器，只移动金属板，即只改变第二列波的波程，让驻波得以形成，当合成波振幅最小（波节）时：

$$z_1 = n\pi / \beta = n\lambda / 2$$

当合成波振幅最大（波腹）时：

$$z_2 = (n + 1/2)\pi / \beta = (2n + 1)\lambda / 4$$

此时合成波振幅最大到合成波振幅最小（波腹到波节）的最短波程差为 $\lambda/4$ ，若此时可动金属板移动的距离为 ΔL ，则：

$$\Delta L = \lambda / 4$$

即：

$$\lambda = 4\Delta L$$

可见，测得了可动金属板移动的距离 ΔL ，代入式中便确定电磁波波长。

四、实验内容及步骤

实验装置如图 4 所示。

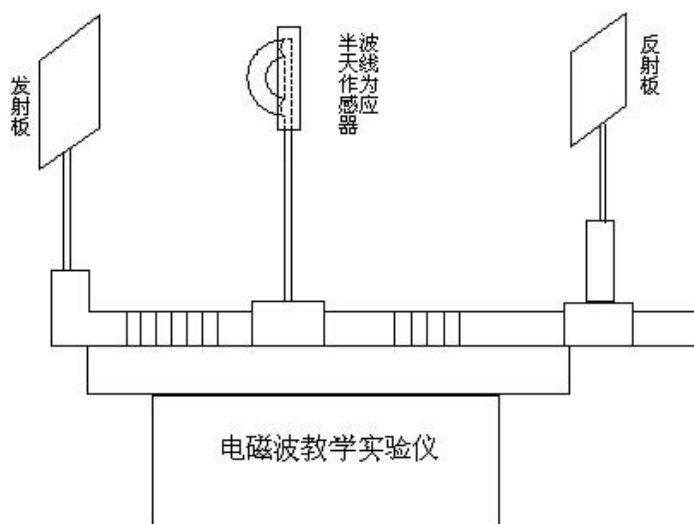


图 4 电磁波教学综合实验仪

1、将设计制作的电磁波感应器（天线）安装在可旋转支臂上，调节其角度与发射天线的极化方向一致，再将支臂滑块移到距离发射天线分别为 30 cm、35cm、40cm 刻度处。

2、开启电磁波教学综合实验仪开关（Power），按下 Tx 按钮，观察发射天线板是否有电磁波发射出来。

3、移动反射板，观察天线上的灯是否有明暗变化。如果没有，检查天线角度是否与发射天线极化方向一致；如果还没有明暗变化，再将支臂滑块移到距离发射天线近一点。

4、如系统正常工作，从远而近移动反射板，使灯泡明暗变化。以灯泡明暗度判断波节和波腹的出现。

先将天线固定于位置 1（30cm），由远而近移动反射板，记录下灯泡两个相邻最亮时反射板位置的坐标（波腹点），其距离即为 $\lambda/2$ 。再将天线固定于位置 2（35cm），重复上述过程。最后将天线固定于位置 3（40cm），重复上述过程。将测量数据记入表 2。

表 2 半波天线测量电磁波波长

次数	天线位置 (cm)	波腹点 1 (cm)	波腹点 2 (cm)	波长 (cm)	平均波长 (cm)	频率 (Hz)
1						
2						
3						

五、注意事项

1、按下 Tx 按钮时，若 Alarm 红色告警灯亮，应立即停止发射，检查电缆线与发射天线接口是否旋紧，其余接口是否用封闭帽盖上，Output 输出接口与电缆是否接好，或请老师检查。否则会损坏仪器。

2、测试感应器时，不能将感应灯靠近发射天线的距离太小，否则会烧毁感应灯。（置于 20cm 以外，或视感应灯亮度而定）。

3、尽量减少按下 Tx 按钮的时间，以免影响其它小组的测试准确性。

4、测试时尽量避免人员走动，以免人体反射影响测试结果。

六、报告要求

1、用自制的接收天线，用白炽灯或电流表测量电磁波的波长，并计算出电磁波的频率。

2、对实验中的现象分析讨论，并对实验误差产生的原因进行分析。

3、描述行波和驻波的特点。什么是波腹点和波节点？如何测量行波的频率？

4、按照标准实验报告纸的格式和内容完成实验报告，按签名单序号排序，一周内收齐交到实验办公室。

实验三 电磁波的极化实验

一、预习要求

- 1、什么是电磁波的极化？它具有什么特点？
- 2、了解各种常用天线的极化特性。
- 3、天线特性与发射（接收）电磁波极化特性之间的有什么关系？

二、实验目的

- 1、研究几种极化波的产生及其特点。
- 2、制作电磁波感应器，进行极化特性实验，与理论结果进行对比、讨论。
- 3、通过实验，加深对电磁波极化特性的理解和认识。

三、实验原理

电磁波的极化是电磁理论中的一个重要概念，它表征在空间给定点上电场强度矢量的取向随时间变化的特性，并用电场强度矢量 E 的端点在空间描绘出的轨迹来表示。由其轨迹方式可得电磁波的极化方式有三种：线极化、圆极化、椭圆极化。极化波都可看成由两个空间垂直、且频率相同的直线极化波在空间的合成，如图 5 所示。设两线极化波沿正 Z 方向传播，一个的极化取向在 X 方向，另一个的极化取向在 Y 方向。若 X 在水平方向， Y 在垂直方向，这两个波就分别为水平极化波和垂直极化波。

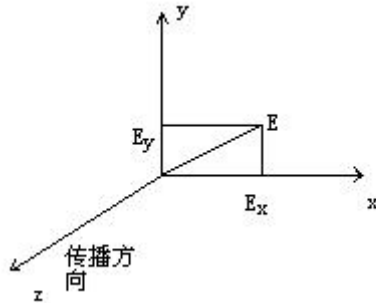


图 5 电磁波的极化方式

若：水平极化波 $E_x = E_{xm} \sin(\omega t - kz)$

垂直极化波 $E_y = E_{ym} \sin(\omega t - kz + \delta)$

其中 E_{xm} 、 E_{ym} 分别是水平极化波和垂直极化波的振幅， δ 是 E_y 超前 E_x 的相角（水平极化波取为参考相面）。

取 $z = 0$ 的平面分析，有：

$$E_x = E_{xm} \sin(\omega t)$$

$$E_y = E_{ym} \sin(\omega t + \delta)$$

综合得：

$$aE_x^2 - bE_xE_y + cE_y^2 = 1$$

式中 a 、 b 、 c 为水平极化波和垂直极化波的振幅 E_{xm} 、 E_{ym} 和相角 δ 有关的常数。

此式是个一般化椭圆方程，它表明由 E_x 、 E_y 合成的电场矢量终端画出的轨迹是一个椭圆。在满足不同条件时，形成三种极化波。

1、当两个线极化波同相或反相（ $\delta=0$ 或 $\delta=\pi$ ）时，其合成波仍是一个线极化波。

2、当两个线极化波振幅相等、相位相差 $\pi/2$ （ $\delta=\pm\pi/2$ ）时，其合成波是一个圆极化波。当 $\delta=+\pi/2$ 时，为左旋圆极化波；当 $\delta=-\pi/2$ 时，为右旋圆极化波。

3、当两个线极化波振幅不等或相位差为任意值时，其合成波是一个椭圆极化波。

可以证明：半波振子天线接收或发射线极化波效果较好。而螺旋天线接收或发射圆极化波及椭圆极化波效果较好。实际上一般螺旋天线在轴线方向不一定产生圆极化波，而是椭圆极化波。当单位长度的螺圈数 N 很大时，发射或接收的波才可看作是圆极化波。

极化波需要重视的是极化的旋转方向问题。一般规定：面对电磁波传播的方向（无论是发射或接收），电场沿顺时针方向旋转的波称为右旋圆极化波，逆时针方向旋转的波称为左旋圆极化波。右旋螺旋天线发射或接收右旋圆极化波效果较好，左旋螺旋天线发射或接收左旋圆极化波效果较好。螺旋天线绕向的判断方法：拇指指向天线辐射方向，当天线的绕向符合右手螺旋定则时，为右旋圆极化，反之为左旋圆极化。

四、实验内容

实验装置如图 6 所示。

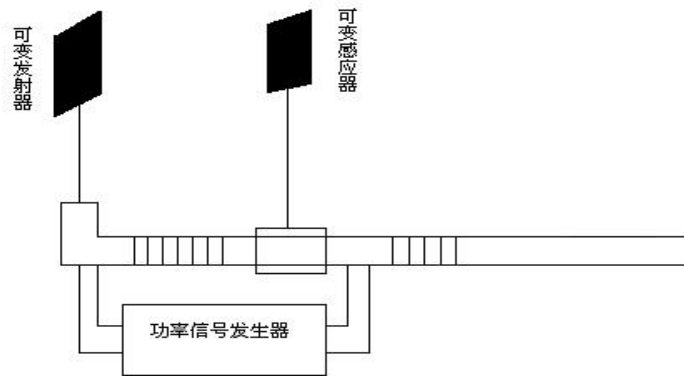


图 6 电磁波极化实验装置

1、将一付发射天线架设在发射支架上，连接好发射电缆，开启电磁波教学综合实验仪开关（Power），电缆线一端接输出端口（Output），另一端分别接发射天线的垂直、水平和圆极化端口。

2、先制作一付半波天线，将电磁波感应器安装在测试支架上。对应不同的发射天线接口，将半波天线分别设置成垂直、水平、斜 45 度三种位置，按下 Tx 发射按钮，并移动感应器滑块，观察灯泡由不亮到亮时距发射天线的距离，并记录数据。

3、分析实验数据，判断出水平极化和垂直极化接口，将测量数据记入表 3。

4、再制作一付相同绕向的螺旋天线，分别对应两个圆极化发射天线接口，将螺旋天线分别设置成垂直、水平、斜 45 度三种位置，按下 Tx 发射按钮，并移动感应器滑块，观察灯泡由不亮到亮时距发射天线的距离，并记录数据。

5、分析实验数据，判断出左旋圆极化和右旋圆极化接口，将测量数据记入表 3。

6、标出相应的接口标号。

表 3 极化波接口测量

极化形式	接收距离 (cm)			接口 标号
	水平	垂直	45 度	
垂直极化				
水平极化				
圆极化 (左旋)				
圆极化 (右旋)				

五、注意事项

1、按下 Tx 按钮时，若 Alarm 红色告警灯亮，应立即停止发射，检查电缆线与发射天线接口是否旋紧，其余接口是否用封闭帽盖上，Output 输出接口与电缆是否接好，或请老师检查。否则会损坏机器。

2、测试感应器时，不能将感应灯靠近发射天线的距离太小，否则会烧毁感应灯。（置于 20cm 以外，或视感应灯亮度而定。）

3、尽量减少按下 Tx 按钮的时间，以免相互影响测试准确性。

4、测试时尽量避免人员走动，以免人体反射影响测试结果。

六、报告要求

1、用自制的接收天线，对应不同的天线极化波接口，调整感应器的角度，用灯泡记录感应器的最大接收距离，分析电磁波的极化形式。

2、讨论电磁波不同极化收发的规律。

3、极化的定义是什么？极化有哪几种形式？圆极化波的旋转方向如何判断？不同形式的极化波应分别用什么样的天线接收？

4、按照标准实验报告纸的格式和内容完成实验报告，按签名单序号排序，一周内收齐交到实验办公室。

实验四 天线方向图测量实验

一、预习要求

- 1、什么是天线的方向性？
- 2、什么是天线的方向图，描述方向图有哪些主要参数？

二、实验目的

- 1、通过天线方向图的测量，理解天线方向性的含义；
- 2、了解天线方向图形成和控制的方法；
- 3、掌握描述方向图的主要参数。

三、实验原理

天线的方向图是表征天线的辐射特性(场强振幅、相位、极化)与空间角度关系的图形。完整的方向图是一个空间立体图形，如图7所示。

它是天线相位中心为球心(坐标原点)，在半径足够大的球面上，逐点测定其辐射特性绘制而成的。测量场强振幅，就得到场强方向图；测量功率，就得到功率方向图；测量极化就得到极化方向图；测量相位就得到相位方向图。若不另加说明，我们所述的方向图均指场强振幅方向图。空间方向图的测绘十分麻烦，实际工作中，一般只需测得水平面和垂直面的方向图就行了。

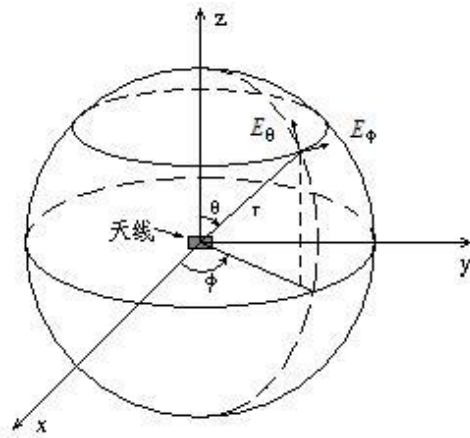


图7 立体方向图

天线的方向图可以用极坐标绘制，也可以用直角坐标绘制。极坐标方向图的特点是直观、简单，从方向图可以直接看出天线辐射场强的空间分布特性。但当天线方向图的主瓣窄而副瓣电平低时，直角坐标绘制法显示出更大的优点。因为表示角度的横坐标和表示辐射强度的纵坐标均可任意选取，例如即使不到1°的主瓣宽度也能清晰地表示出来，而极坐标却无法绘制。一般绘制方向图时都是经过归一化的，即径向长度(极坐标)或纵坐标值(直角坐标)是以相对场强 $E(\theta,\varphi)/E_{\max}$ 表示。这里， $E(\theta,\varphi)$ 是任一方向的场强值， E_{\max} 是最大辐射方向的场强值。因此，归一化最大值是1。对于极低副瓣电平天线的方向图，大多采用分贝值表示，归一化最大值取为零分贝。图8所示为同一天线方向图的两坐标表示法。

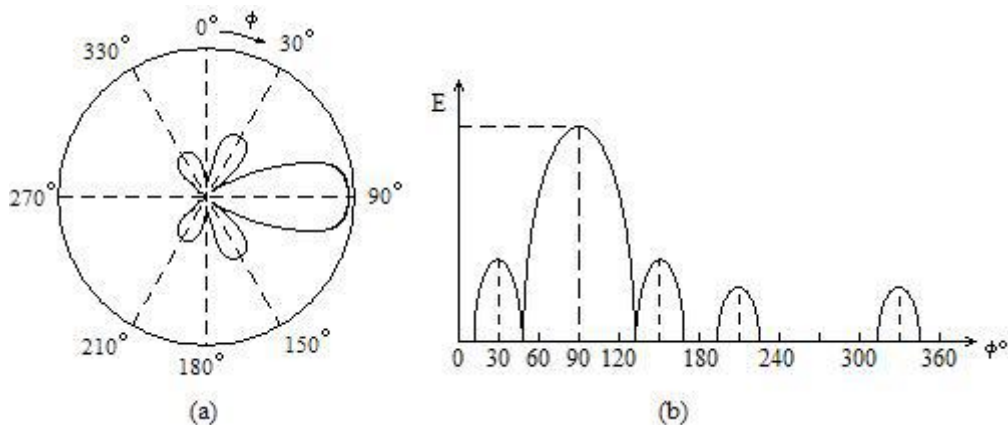


图 8 方向图表示法 (a) 极坐标 (b) 直角坐标

本实验测量一种天线的方向图，测试系统框图如图 9 所示。其中，辅助天线作发射，由功率信号发生器激励产生电磁波；被测天线作接收，被测天线置于可以水平旋转的实验支架上，接收到的高频信号经检波后送给电流指示器显示。

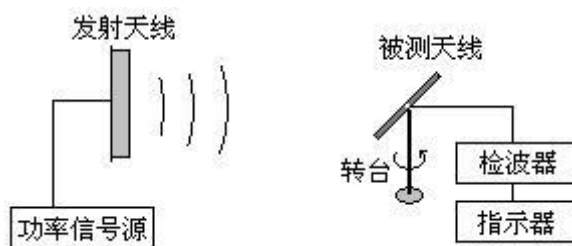


图 9 方向图测试系统

四、实验内容与步骤

- 1、打开功率信号发生器电源开关，Signal 灯亮，机器工作正常，按下 TX 按钮，观察功率指示表有一定偏转，说明发射正常。
- 2、将检波天线架设于极化支架上，连接好天线到电流表的电缆，按下 TX 按钮，电流表应有一定指示，说明接收部分工作正常。
- 3、设定被测天线的架设距离，使天线旋转 360° 的电流读数在量程范围内。
- 4、固定被测天线位置，连续旋转天线支架，按一定角度步进，读出每个步进角度对应的电流表指示值。
- 5、将测量数据在直角坐标系中画出天线的方向图。并在图上读出方向图的主瓣宽度和副瓣电平。

五、注意事项

- 1、按下 TX 按钮时，若 Alarm 红色告警灯亮，应立即停止发射，检查波段插口与波段开关是

否对应，发射天线是否接好，或请老师检查。否则会损坏机仪器。

2、尽量减少按下 TX 按钮的时间，以免影响其它小组的测试准确性。

3、测试时尽量避免人员走动，以免人体反射影响测试结果。

六、报告要求

1、简述天线方向图的定义；分别画出半波天线在 E 面和 H 面的极坐标方向图。

2、数据记录与处理：

(1) 分别在 E 面和 H 面旋转被测天线，将数据记录入表 4。

表 4 E 面和 H 面方向图测量

E 面	角度	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
	电流																				
	角度	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360		
	电流																				
H 面	角度	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
	电流																				
	角度	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360		
	电流																				

(2) 根据上面的数据，在方格图中点绘出 E 面和 H 面的直角坐标方向图。



0°

180°

360°

- (3) 根据上面的数据，读出方向图 E 面的主瓣宽度和电平。
- 3、分析该实验中方向图测量误差产生的因素有那些？
- 4、按照标准实验报告纸的格式和内容完成实验报告，按签名单序号排序，一周内收齐交到实验办公室。

附录 实验演示视频（微信扫一扫）

一、电磁波感应器的设计与制作实验演示视频



二、电磁波传播特性实验演示视频



三、电磁波的极化实验演示视频



四、天线方向图测量实验演示视频

