

内容概要

- 背景介绍
- 原理分析
- 实验设计
- 实验数据分析
- 改进方案设想
- 应用前景

背景

- 1899年, Nikola Tesla 点亮25英里以外的氖气照明灯。
- 1987年一架小型飞机依靠RF波束提供的能量在空中飞行。
- 2007年MIT的科学家利用电磁谐振原理在2 m多距离内将一个60 W的灯泡点亮, 且传输效率达到40%左右。

原理分析

C_S, C_D : 发射电路和接收电路的分布电容
 L_S, L_D : 发射线圈和接收线圈的自感
 R_W : 负载

$$Z_S = R_S + j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} \quad Z_D = R_D + R_W + j\omega L_D + \frac{1}{j\omega C_D}$$

由
$$\begin{cases} u_{in} + j\omega M i_D = Z_S i_S \\ j\omega M i_S = Z_D i_D \end{cases} \quad \text{得}$$

$$i_S = \frac{Z_D u_{in}}{Z_S Z_D + (\omega M)^2} \quad i_D = \frac{-j\omega M u_{in}}{Z_S Z_D + (\omega M)^2}$$

由此算出, 两线圈之间的传输效率为:

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_W}{Z_D [Z_S Z_D + (\omega M)^2]}$$

代入 Z_S, Z_D , 有

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_W}{[R_D + R_W + j(\omega L_D - \frac{1}{\omega C_D})] \cdot [R_S + j(\omega L_S - \frac{1}{\omega C_S})] \cdot [R_D + R_W + j(\omega L_D - \frac{1}{\omega C_D})] + (\omega M)^2}$$

由上式可以看出, 当 L_S 和 L_D 同时谐振, 即

$$\omega L_S - \frac{1}{\omega C_S} = 0 \quad \omega L_D - \frac{1}{\omega C_D} = 0$$

时, 效率最大, 此时 $Z_S = R_S \quad Z_D = R_D + R_W$

效率的表达式为

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_W}{(R_D + R_W) \cdot [R_S \cdot (R_D + R_W) + (\omega M)^2]}$$

实验设计

ZVS模块电路图

实验设计

实验参数：
 为实现谐振耦合，两线圈参数相同
 线圈直径：110mm
 线圈宽度：7.2mm
 导线直径：0.59mm
 线圈匝数：10

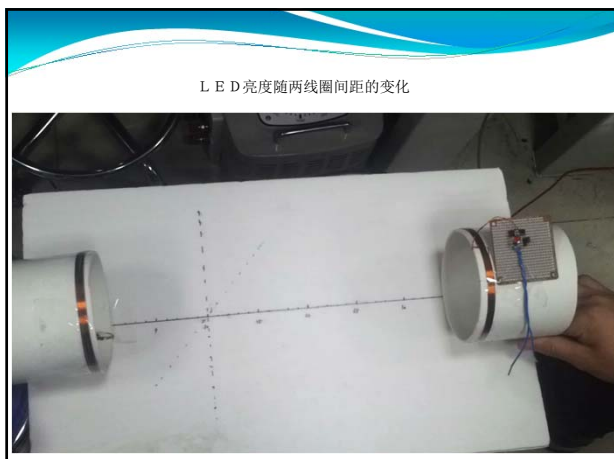
恒压恒流电源
 ZVS信号发生器
 发射线圈
 接收线圈
 负载

实验过程

- 用示波器测出装置的谐振频率
- 使两线圈轴线重合，改变两线圈间距，测量效率
- 保持两线圈垂直距离10cm，改变水平间距，测量效率
- 在两线圈间不同位置插入铝板，测量效率
- 在两线圈间不同位置插入1.5cm厚的书，测量效率

观察效率随垂直距离的变化

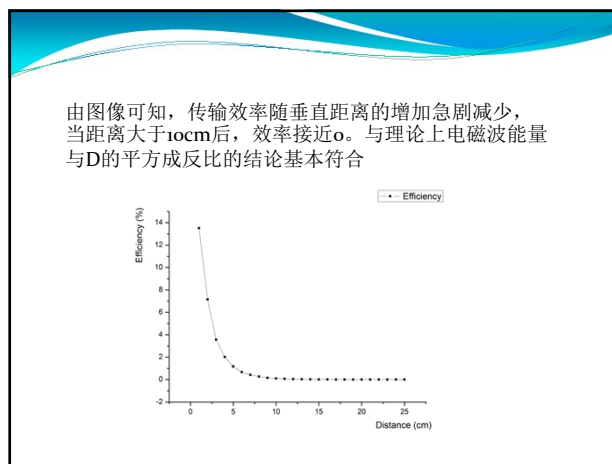
观察效率随水平距离的变化



实验数据分析

效率随垂直距离的变化 (实验测得谐振频率为860kHz, 发射端输出功率: 2W)

D/cm	Eff/%	D/cm	Eff/%	D/cm	Eff/%	D/cm	Eff/%	D/cm	Eff/%
1	14	6	0.67	11	0.067	16	0.0087	21	0.0017
2	7.2	7	0.42	12	0.043	17	0.0061	22	0.0013
3	3.6	8	0.26	13	0.027	18	0.0044	23	0.0010
4	2.0	9	0.16	14	0.019	19	0.0031	24	0.00079
5	1.2	10	0.10	15	0.013	20	0.0022	25	0.00060



效率随水平距离的变化

D/cm	Eff/%
0	0.10
2	0.098
4	0.067
5	0.043
7	0.022
9	0.0077
10	0.0037

由实验数据知, 效率随两线圈的正对面积的减小而减小, 分析原因, 是因为这样会使穿过接收线圈的电磁通量减少, 所以传输能量时, 需要定向, 否则会造成本很大的能量损失

铝板对能量输送的影响

D/cm	U/V
2	0.15
5	0.27
8	0.22
10	0.04

无铝板时, 负载两端电压为 1.56V

由实验数据可知在两线圈之间插入铝片会接收功率明显减少, 且改变铝片在两线圈间的位置接收功率会有所改变, 说明铝片对电磁波有明显的反射作用。因此, 实际应用中, 地面上的金属障碍物会对能量的传输造成很大影响。

绝缘体对能量输送的影响

D/cm	U/V
2	1.75
5	1.73
8	1.73

无绝缘板时，负载电压为1.56V

在两线圈间加入绝缘性物质，负载电压略有增大，.....

改进方案设想

1. 从以上实验可以看出，传输距离，线圈间的正对面积，以及线圈间的物质都会对传输效率有较大的影响，
2. 由效率公式知，频率越高，效率越高，但是谐振频率又由线圈的本身参数确定（在频率不高的情况下 $\omega = \frac{1}{\sqrt{L C}}$ ），所以我们减少线圈匝数。在同样的互感值下，增大线圈半径 r ，可增加传输距离 D
3. 设计一个效率更高的ZVS，来提供高频功率输出的信号。

应用前景

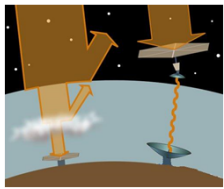
- 军事用途

基于谐振耦合的无限能量传输方案，为提高传输效率，需要增大频率，而高频的电磁波对体会有一定的伤害，但是，可以应用于军事特殊作战任务中。如利用飞机对地面上的机器人进行充电。

应用前景

- 传送卫星太阳能电站的电能

所谓卫星太阳能电站，就是用运载火箭或航天飞机将太阳能电池板或太阳能聚光镜等材料发送到赤道上空35 800 km 的地球静止同步轨道上，在那里宇航员或机器人将它们安装起来，或者太阳能电池把阳光直接转变为电能，或者用太阳能聚光镜把阳光汇聚起来作为热源，像地面热电厂一样发电，这样产生的电能供给微波源或激光器，然后采用无线输电技术将大功率电磁射束发送至地面，接收到的微波能量经整流器后变成直流电，由变、配电设施供给用户。



设想

- 效率问题与电磁波传播是否可以定向有很大关系，而且过强的电磁辐射对体会造成较大伤害，如能实现电磁波的定向传播，一方面可以提高传输效率，另一方面也可以减轻对人体的伤害。
- 如果可以将发射出的电磁波用激光等定向性比较强的物质束缚起来传播，就像“光纤”一样，就可以实现定向传输。

致谢

感谢少年班学院提供的实验室



致谢

- 感谢徐春凯老师和叶邦角老师的指导
- 感谢曹原同学为这次实验指导设计的 Z V S 模块和唐骐杰同学为本次实验提供的电源
- 感谢刘京倍同学的大力支持

谢谢