

# 浙江大学



## 电网络分析实验报告

姓名: 刘云轩

学院: 电气工程学院

专业: 电气工程及其自动化

学号: 3230102986

指导教师: 孙盾

课程名称:电网络分析

实验类型:研究探索型实验

实验项目名称:无功补偿与功率因数的提高

学生姓名:刘云轩

专业:电气工程及其自动化

学号:3200103860

同组学生姓名:

指导老师:孙盾

实验地点:东 3-206

实验日期:2025 年 2 月 19 日

## 一. 实验目的和要求

### 1.1. 实验目的和要求

1. 了解用电系统重进行无功补偿的背景和意义
2. 熟悉荧光灯电路的组成、工作原理,掌握并联电容进行无功补偿的原理
3. 通过实验学习功率因数提高的方法
4. 学习测量数据的处理,了解有理经验公式的求取方法

### 1.2. 实验要求

实验要求保持日光灯两端电压不变的条件下测定电流  $I$ 、功率  $P$ 、功率因数  $\cos \phi$  与补偿电容  $C$  的关系,绘制曲线图,分析实验结果。

## 二. 实验原理

正弦交流电路中,无源一端口网络吸收的有功功率为  $UI \cos \psi$ ,其中,  $\cos \psi$  被称为功率因数,角度为功率因数角,为负载电压与电流的相位差。功率因数越小,传输的电流越大,线路上的损耗越大。在工程上为了减少损耗,供电部门会要求用户尽量提高用电设备的功率因数

本次实验中,对实际的应用场景进行了简化,低功率因数感性负载由荧光灯管、镇流器和启辉器组成

1. 日光灯电路简化为一个电阻  $R$  和一个电感  $L$  的串联,作为感性负载
2. 提高感性负载功率因数的方法在电路原理中讲过原理:并联电容

1. 在补偿电容较小的时候,会产生欠补偿的现象,功率因数有所提高但是仍然未达到目标数值
2. 在补偿电容的 $\frac{1}{\omega c}$ 等于日光灯的感抗 $\omega L$ 时,此时正好达到完全补偿
3. 在补偿电容的容抗大于日光灯的感抗时,此时是过补偿的状态,功率因数回落,电路从容抗开始出现感抗

电容的等效电导: 在并联电容数值较大时,其介质损耗不能忽略,近似认为损耗与电容量成正比,用与C并联的等效电导 $gC$ 表示。其中 $g$ 为电容器50Hz时单位电容的等效电导

$$P = U^2(gC_x + R_L) = gC_x U^2 + P_{\{\% \}}$$

在公式中, $P_{\{\% \}}$ 是电容位0法拉时的功率,由于拟合P-C图像求得

可以利用 $I^2 - C$ 曲线求补偿电容。当补偿电容未接入时,电源电压U,线路总电流为 $I_{\{\% \}}$

则有

$$I_{\{CX\}}^2 = (I_R + gC_x U)^2 + (I_L - \omega C_x U)^2$$

$$I_{\{cx\}}^2 = aC_x^2 + bC_x^2 + I_{\{\% \}}^2$$

通过你和图像可以求得图中的ab,可以得到任意补偿下的补偿电容大小

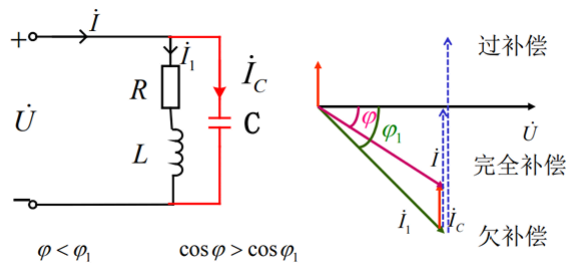


图 4 实验原理图

### 三. 主要仪器参数(列出所使用的一起设备的名称型号等)

1. 输入电源: 三相五线, 单相 220V $\pm$ 10%, 3A, 50HZ: 三相可调交流电源输出端 L1、L2、L3、N 可输出 0-250V 相电压, 设备包含三相断路器、保险丝、切换开关和自耦调压器, 其中自耦调压器的调节手柄在实验设备左下侧。切换开关左拧为 380V 固定输出, 右拧为调压输出(手柄调压)
2. 可变电容/感性负载/三相负载: 可变电容范围 1-10uf, 分辨率 0.1uf, 耐压 400V; 感性负载功率 20W, 额定电压 220V
3. 功率/功率因数表: 带超量程保护, 仪表精度 0.5 级, 电压量程 0-500V, 电流量程不小于 3A, 可通过按键 $\leftarrow$ 、 $\rightarrow$ 切换功能显示, 按键 $\leftarrow$ 、 $\rightarrow$ 切换功能显示, 包含功能有电压、电流、有功功率、无功功率、视载功率、功率因数、相位角

#### 四. 实验步骤和操作方法

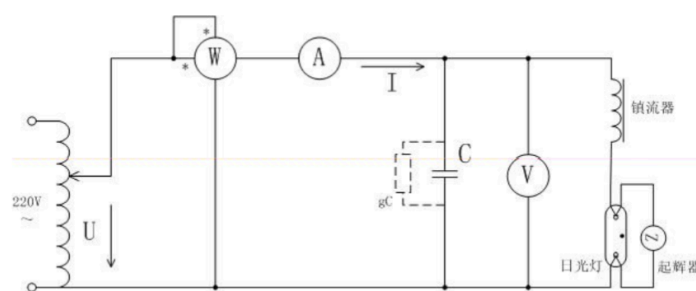


图 5 接线

如 图 5 所示接入电路,然后在 50hz 的交流电频率下,测量镇流器,灯管,两者串联的消耗功率及其功率因数

1. 电容 C 暂时不接入电路,连接线路,点亮日光灯;
2. 如果是逐步点亮具体步骤为:转动电源电压大小调节旋钮,逐步增大电源电压,要求用交流电压表监测端电压(灯管+镇流器两端的电压),当电压达到 180V 左右,启辉器开始动作,日光灯有闪亮。日光灯点亮之后,调节电源电压到 220V,保持不变,记录数据。
3. 本次采用直接点亮,直接点亮的步骤为:打开电源开关,转到 380v 输入电压,确保启辉器连接正确,日光灯管两端电压为 220V 左右,日光灯管点亮。
4. 如果不亮,进行线路故障检查:用万用表检查日光灯管和启辉器是否完好;
5. 日光灯启动过程中,仪表量程要选择足够的余量。分别将功率表接到测量的部分两端,进行数据记录。记录数据时,应改变合适的量程读取数据。日光灯管是非线性器件,需要点亮数后待数据显示趋于稳定后,再读取记录  $I$ 、 $P$ 、 $U$ 、 $\phi$  等实验数据。
6. 电容器 C 并联接入电路,其数值从 0 开始逐步增加,直到最大值  $10\mu\text{F}$  左右,增加的步长应根据功率因数的变化进行调整,最大不应超过  $1\mu\text{F}$ ,实验过程中可根据电流表的示数变化来判断。在功率因数较高(电流值较小)的时候,需要多取测量数据点
7. 实验过程数据检查:记录完全补偿电容时的电流和功率值。
8. 注意用电安全,改线路时一定要切断电源。实验结束后断电,整理实验仪器和桌面。

## 五. 实验数据记录和处理(如实记录)

### 5.1. 实验任务 1: 测量镇流器, 灯管, 两者串联的消耗功率及其功率因数

测量元器件	功率/w	功率因数 $\cos \varphi$	电压/V	电流/I
两者串联	28.9	0.413	2271.1	0.311
日光灯管	16.3	0.854	63.4	0.309
镇流器	13.6	0.219	200.9	0.308

此时基本可以得到以下规律

1. 镇流器的功率和日关灯管的功率相加基本等于两者串联的功率. 镇流器的电压和日光灯管的电压相加基本等于两者串联的电压
2. 三次测量的电流接近, 可以认为是仪器的误差
3. 镇流器的功率因数较低, 日光灯管的功率因数较高

### 5.2. 保持日光灯两端电压不变的条件下测定电流 I、功率 P、功率因数 $\cos \Phi$ 与电容 C 的关系

并联电 容 $C(\mu F)$	U(v)	I(mA)	P(w)	$\cos(\psi)$
0	227.3	309	29.3	0.42
0.1	227.1	301	29.5	0.431
0.2	227	294	29.5	0.442
0.3	227.3	288	29.5	0.453
0.4	227.4	290	29.5	0.464
0.5	227.4	275	29.6	0.475
0.6	227.6	268	29.6	0.487
0.9	227.7	250	29.7	0.523
1.2	227.6	233	29.7	0.562

并联电 容 $C(\mu F)$	U(v)	I(mA)	P(w)	$\cos(\psi)$
3.6	227.3	186	29.8	0.706
3.7	227.1	193	29.7	0.681
3.8	227.2	194	29.7	0.678
3.9	227.3	199	29.8	0.651
4	227.3	211	29.9	0.622
4.4	227.1	229	29.9	0.573
4.8	226.9	253	29.9	0.522
5.2	226.6	284	29.8	0.457
5.6	226.8	282	29.8	0.47

1.5	227.7	216	29.8	0.608
1.8	227.5	200	29.7	0.658
2.1	227.5	195	29.6	0.665
2.4	227.2	188	29.7	0.7
2.7	227	181	29.7	0.722
3	227.2	182	29.7	0.73
3.1	227.2	180	29.7	0.73
3.2	227.1	175	29.7	0.74
3.3	227.1	183	29.6	0.726
3.4	226.7	187	29.7	0.718
3.5	226.8	187	29.7	0.71

6	226.8	330	29.9	0.399
6.4	226.7	357	29.9	0.376
6.8	227.1	352	29.9	0.372
7.2	227.1	382	29.9	0.347
7.6	227	410	29.7	0.329
8	227.2	427	30	0.304
8.4	227.2	466	30.1	0.285
8.8	227.4	483	30.1	0.275
9.2	227.2	509	29.9	0.261
9.6	227.3	538	30.1	0.247
10	227.5	574	30.1	0.235

## 六. 实验结果与分析

### 6.1. 日光灯管和镇流器的功率及功率因数

其中三表法测量无源一端口的等效参数,我们根据公式

$$R_0 = \frac{P}{I^2} = 305.9\Omega$$

$$Z = \frac{U}{I} = 849.23\Omega$$

$$X_0 = \sqrt{Z^2 - R_0^2} = 268.52\Omega$$

得到  $X_0 = 268.52\Omega$ ,  $Z = 849.23\Omega$

因此可以验证:镇流器和日光灯管串联时,是感性负载,等效参数

$$Z = R_0 + j\omega L = (305.9 + 268.52j)\Omega$$

电源频率为 50Hz,因此感性负载的等效电感大小为

$$L = \frac{X_0}{\omega} = 5.37mH$$

### 6.2. 作出 I、P、cos φ 和电容 C 的关系曲线

matlab 通过 csv 文件导入数据,再通过拟合曲线得到公式,代码如下

```

% 导入数据
data = csvread('data.csv');

% 提取数据
I = data(:,1);
P = data(:,2);
cos_phi = data(:,3);
C = data(:,4);

% 拟合曲线
% 示例: 拟合 I 与 P 的关系
p1 = fit(I, P, 'poly1');
p2 = fit(I, cos_phi, 'poly1');
p3 = fit(I, C, 'poly1');

% 显示公式
disp('I vs P: ');
disp(p1);
disp('I vs cos_phi: ');
disp(p2);
disp('I vs C: ');
disp(p3);

```

```

figure; % 创建一个新的图形窗口

subplot(1,1,1); % 创建子图, 这里是第一个子图

plot(C, cos); % 绘制 C 和 P 列的数据

xlabel('C'); % 设置 x 轴标签

ylabel('cos'); % 设置 y 轴标签

title('Plot of C vs cos'); % 设置标题


scatter(C,cos , 'o', 'MarkerEdgeColor', 'b', 'MarkerFaceColor', 'w');
hold on;


% 添加标题和轴标签

title('cos/C');
xlabel('C (\muF)');
ylabel('(\cos)');

p = polyfit(C, cos , 2); % 1 表示 1 次多项

C_fit = linspace(min(C), max(C), 100); % 生成拟合曲线的 x 值

cospsi_fit = polyval(p, C_fit); % 计算拟合曲线的 y 值


% 绘制拟合曲线

plot(C_fit, cospsi_fit, 'r', 'LineWidth', 1.5);


% 添加图例

legend('Data', 'Fit', 'Location', 'best');


coefs = p; % 获取拟合系数

formulaStr = sprintf('y = %.2fx^2 + %.2fx + %.2f', coefs(1), coefs(2), coefs(3));


% 在图形上添加公式文本

text(max(C), max(cos), formulaStr, 'FontSize', 12, 'Color', 'red',
'HorizontalAlignment', 'right');


% 设置图形属性

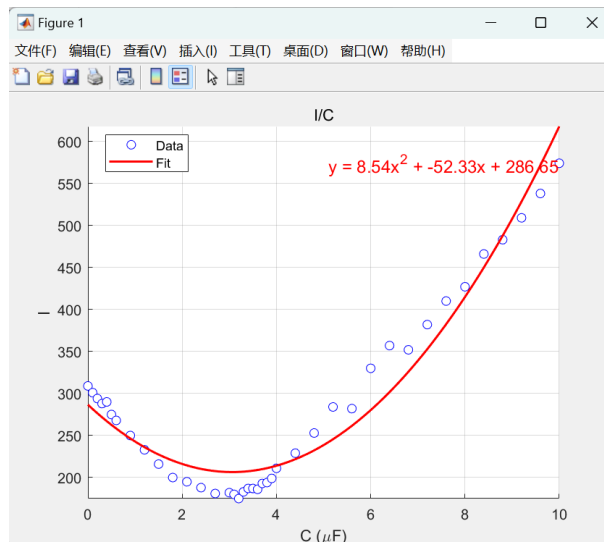
grid on; % 添加网格

```

```
axis tight; % 紧凑显示
hold off; % 关闭保持状态
```

每一个曲线的拟合函数如下

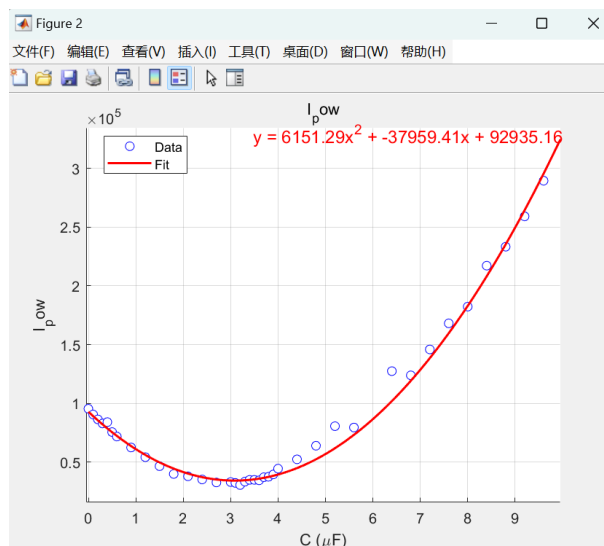
### 6.2.1. I-C 曲线



经过 MATLAB 对实验数据进行二次拟合，得到函数为

$$I = 8.54C^2 - 52.33C + 286.65$$

### 6.2.2. $I^2$ -C 曲线



由实验原理可知，当补偿电容未接入时，电源电压  $U$ ，线路总电流为  $I_{co}$ ，设电容  $C_x$  时的总电流为  $I_{cx}$ ，则有：



$$I_{cx}^2 = (I_R + gC_x U)^2 + (I_L - \omega C_x U)^2$$

$$I_{cx}^2 = aC_x^2 + bC_x + I_{co}^2$$

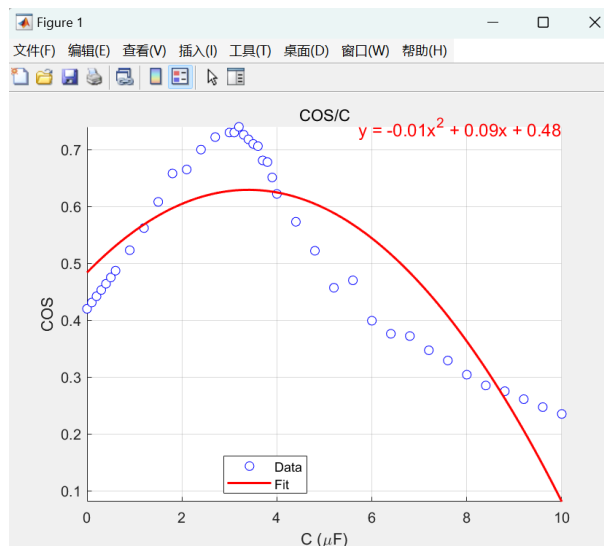
由拟合所得二次曲线的公式

$$a = 6151.29, b = -37959.41, I_{co}^2 = 92935.16 \text{mA}^2$$

实验和拟合图像中的数据略有差异，可能是由于电流测量仪表本身的测量误差、显示读数不稳定、拟合图像有偏差、所用电容的标示值与实际值不符等原因导致。但是相对误差在可接受范围内。利用该曲线求完全补偿电容，功率因数最大时，由  $P = UI \cos \phi$  得  $I$  取最小值时得到。经过计算得

$$C_x = 3.3 \mu\text{F}$$

### 6.2.3. Cos-C 曲线



拟合函数是

$$\cos = -0.01C^2 + 0.09C + 0.48$$

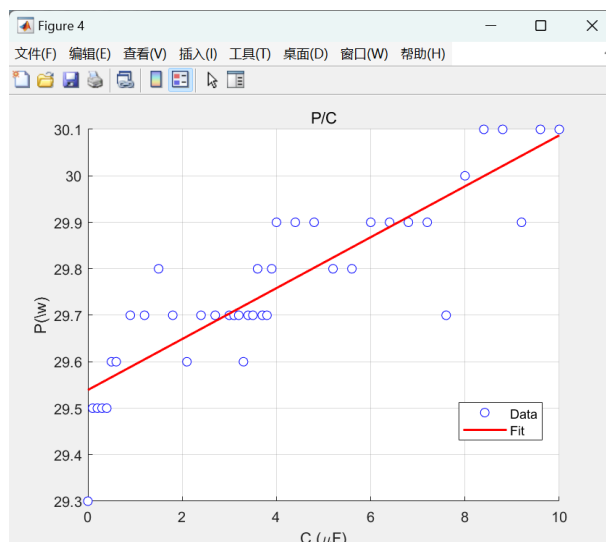
可以计算得到当

$$C = -\frac{b}{2a}$$

即  $C = 3.3 \mu\text{F}$  时，功率因数达到最大

### 6.3. 用 P-C 曲线求单位电容的等效电导 $g$

$$P = aC + b$$



$$a = 0.09, b = 29.54$$

$$P = 0.09C + 29.54$$

由  $P = U_2(gC_x + RL) = gC_x U_2 + PC_0$  可知，P 与 C 呈线性关系

由拟图像的公式知  $gU_2 = 0.009sV_2/F$ ，其中  $U = 220V, g = 1.98 \times 10^{-6}s/\mu F$

由图像发现 P-C 的线性关系并不是很明显。事实上实验中功率的变化范围 变化范围极小，在这里可认为几乎没有变化，因此本实验中电解电容的介质损耗也极小。因此线性拟合后图像的斜率也较小，因此本实验中电容的等效电导也很小。因为电解电容的等效电导是由于介质损耗而产生的，可能由于本实验室中电容比较新或性能比较好，该损耗较弱，因此等效电导较小。

## 七. 讨论与心得(讨论实验,记录收获,体会与建议)

### 7.1. 实验心得

在本次实验中，我们深入探究了提高功率因数的重要性及其方法。通过实验，我们了解到在日常用电过程中，提高功率因数可以有效降低电能传输过程中的损耗。为了实现这一目标，我们通常采用并联电容的方式对感性负载进行补偿。此外，我们还学习了如何通过 MATLAB 曲线拟合的方法来确定最佳的补偿电容值，从而实现理论上的完全补偿。

然而，在实际操作中，我们发现实验结果往往会受到多种因素的影响。例如，电压的不稳定性以及电表测量误差等都会导致实验数据出现偏差。因此，我们需要耐心地调整仪器，掌握正确的读数方法，并运用合适的数据处理手段，以确保最终得出准确的结论。通过本次实验，我们不仅积累了宝贵的实践经验，还为后续的实验学习奠定了坚实的基础，期待在未来的实验中能够学到更多的知识。

## 7.2. 讨论及思考题

7.2.1. 若只有一只电流表，不使用功率表，如何判断功率因数的增减？什么情况下  $\cos \varphi = 1$ ？

当负载的有功功率保持不变时，根据公式  $P = UI \cos \varphi$  可以推导出当电流  $I$  减小时，功率因数  $\cos \varphi$  会相应增加。因此，通过观察电流表的示数变化，我们可以判断功率因数的增减：电流表示数减小，功率因数增加；电流表示数增大，功率因数减小。

当负载的感抗和容抗完全抵消时，电压  $U$  和电流  $I$  的相位差为零，此时功率因数  $\cos \varphi$  达到最大值 1。

7.2.2. 电容器是否有功率损耗？如何确定？当电容量改变时，电流表和功率表的读数将有什么变化？

电容器在接入电路时，确实存在功率损耗，这种损耗主要来源于介质损耗。通常可以用与电容并联的等效电导  $g_C$  来表示，其中  $g$  是电容器单位电容的等效电导。通过绘制  $P-C$  曲线，可以计算出  $g$  的值，从而确定电容器的功率损耗。

当电容量从零开始逐渐增加时，对于本实验中的感性负载，电流表的示数会先减小后增加。这是因为电容补偿初期，感性负载的无功功率被部分抵消，电流减小；但当电容过大时，又会产生新的无功功率，导致电流重新增加。功率表的示数则会由于等效电导的存在而缓慢增加，但总体变化幅度较小。功率因数则会先增加后减小，这是因为电容补偿初期，感抗和容抗相互抵消，功率因数提高；但当电容过大时，容性无功功率增加，功率因数又会下降。

7.2.3. 在进行功率因数补偿时，采用并联电容的方法，为什么不采用串联电容器的方法？

在实际应用中，感性负载通常需要保持其两端电压不变（例如 220V），才能正常工作。如果采用串联电容的方式，会导致负载两端的电压发生变化，无法满足正常工作的电压要求。而采用并联电容的方式，可以有效补偿无功功率，同时保持负载两端的电压稳定，确保负载的正常运行。因此，为了保证电压的稳定性和负载的正常工作，我们通常采用并联补偿电容的方法。