

2015 年校级教学改革研究重点课题
湖南人文科技学院教材建设基金资助项目

电路与电子技术实验

主 审 成 运
编 著 李 强 付又香 刘云连
程正梅 李朝鹏

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

电路与电子技术实验：含实验报告 / 李强等编著.
—成都：西南交通大学出版社，2015.10
ISBN 978-7-5643-4343-9

I. ①电… II. ①李… III. ①电路 - 实验 - 高等学校
- 教材②电子技术 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV.
①TM13-33②TN-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 244157

电路与电子技术实验

(实验报告)

编著 李强 付又香 刘云连 程正梅 李朝鹏

责任编辑 黄淑文
封面设计 墨创文化

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区交大路 146 号)

发行部电话 028-87600564 028-87600533

邮政编码 610031

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

总印张 18.25

总字数 444 千

版次 2015 年 10 月第 1 版

印次 2015 年 10 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-4343-9

套价 45.00 元

课件咨询电话：028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前 言

本教材是按《中长期教育改革和发展规划纲要 2010—2020》的总体要求，以教育部《关于地方本科高校转型发展的指导意见（征求意见稿）》为基本依据，结合我校转型发展的实际情况而编写的。将电路、模电、数电与高频电子线路等多门实验课程整合到一本教材，避免了过去实验教学中实验内容重复、分散与知识点乱等问题，是实验教学改革的一项基础性工作。

每个实验课题的内容以相关理论课程的纵向体系为依据进行整合，每个课题包含一个基本的知识模块，将过去的多个实验整合到一个课题之中，由于内容丰富，可实现分层次教学，满足不同学习需求与不同学习能力的学生进行实践。

教材提供了四个综合实训课题，这些课题的内容既不同于过去的设计与研究性实验，又与课程设计有区别，学生通过阅读教材的内容，可独立地在实验室完成相关的设计、操作、实现与考核，旨在提高学生的工程设计与实施的能力。

教材中提供了实验报告的模板，实验中测量的数据、计算的内容大为减少，不再写过多的实验原理与步骤，节约学生时间用于真正的实验过程，并且老师可进行现场的指点与批阅。

本书的编写分工如下：7个电路实验课题，由李强副教授完成；9个模电实验课题，由付又香高级实验师和李强编写；7个数电实验课题，由李朝鹏副教授编写初稿，刘云连老师完成定稿；4个高频电子线路实验课题，由程正梅老师完成；4个综合实训课题分别由李强、付又香、刘云连与程正梅老师编写完成。全书由李强副教授负责统稿。

在编写过程中得到了蒋建初教授的指导，羊四清教授、刘浩博士给予了大力的支持，成运教授对全书进行了全面的审阅，并提出了宝贵的意见。张银和老师对电路实验讲义进行了试用，提出的诸多修改意见被采纳，钟明生老师为模电实验做了一些前期的准备工作，苏芙华老师为数电实验做了前期的准备工作。本教材由湖南人文科技学院教材建设资金提供资助。在此，一并表示由衷的感谢。

教材参考了设备厂家提供的相关讲义与使用说明书，特此致谢。

本书可供电子信息工程、电子信息科学与技术、通信工程、物理学、自动化、机械设计制造及其自动化、能源与动力工程、材料成型及控制工程、计算机科学与技术、物联网、软件工程、网络工程等专业的相关实验课程选择使用。

由于编者水平有限，对内容把握不准，本书缺点与错误在所难免，恳请读者批评指正。

于湖南人文科技学院百全楼

2015年9月

目 录

第一章 电路实验	1
实验一 直流电路基本规律的验证	1
实验二 有源二端网络的等效参数及变换研究	5
实验三 一阶、二阶网络响应特性研究	11
实验四 正弦稳态交流电路研究	17
实验五 RLC 谐振电路频率特性研究	22
实验六 三相负载特性与变压器特性研究	28
实验七 三相鼠笼式异步电动机运行控制	34
第二章 模拟电子技术实验	40
实验一 射极跟随器电路研究	40
实验二 晶体管共射极单管放大电路研究	45
实验三 模拟集成运算器与应用电路研究	54
实验四 负反馈放大电路特性研究	64
实验五 OTL 低频功率放大器研究	71
实验六 正弦波、方波与三角波产生电路研究	80
实验七 电压比较器特性及应用研究	87
实验八 串联型稳压电源的设计与测试	92
实验九 集成稳压器电路特性及应用研究	100
第三章 数字电子技术实验	107
实验一 基本组合逻辑电路功能研究	107
实验二 编码器和译码器及其扩展功能	114
实验三 数据选择器、分配器及其应用	120
实验四 触发器及其应用	125
实验五 计数器及其应用	132
实验六 555 定时器及其应用	137
实验七 D/A 与 A/D 转换电路研究	143
第四章 高频电子线路实验	149
实验一 谐振回路放大器研究	149
实验二 频率调制与合成实验研究	155

实验三 幅度调制/解调实验研究	162
实验四 高频信号的功率放大、发射与接收	170
第五章 综合实训	176
电路实训 电路安装工艺训练	176
模电实训 音频放大器的设计与实现	184
数电实训 四路智力竞赛抢答装置设计与实现	196
高频实训 调频收音对讲机的安装与调试	204
参考文献	217

第一章 电路实验

实验一 直流电路基本规律的验证

一、实验基本任务

- (1) 验证基尔霍夫电流定律；
- (2) 验证基尔霍夫电压定律；
- (3) 验证叠加定理。

完成任务：(1) 的满分为 70 分，(1) + (2) 的满分为 90 分，(1) + (2) + (3) 的满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 掌握基尔霍夫定律与叠加定理；
- (2) 掌握电路参考方向与电压、电流的正负的关系；
- (3) 掌握参考点、电位、电压之间的关系；
- (4) 学会根据电路原理图连接正确的测量电路。

三、实验原理

1. 基本概念

节点：3 个或 3 个以上电路元件的连接点称为节点。

支路：连接两个节点之间的电路称为支路。

电流参考方向：对某二端元件，端点分别为 A 与 B ，在导线上用箭头标示电流的参考方向，流过这个元件的电流方向与箭头方向相同时，电流大于零，反之，电流小于零。

电压参考方向：对电路两点之间的电压，用正极性 (+) A 点表示高电位，负极性 (-) B 点表示低电位，由正极指向负极的方向（即 A 指向 B ）就是电压的参考方向。如果 A 点电位确实高于 B 点电位，则电压 u 大于零，反之，电压小于零。

电压与电位的关系：电路中的参考点选择不同，各节点的电位也相应改变，但任意两点的电压（电位差）不变，即任意两点的电压与参考点的选择无关。

$$U_{AB} = U_A - U_B = U_{OA} - U_{OB}$$

闭合回路：由多个支路构成的一个首尾相连的圆就是一个闭合回路。可人为地规定一个回路绕行的正方向。

线性电路：线性就是指输入量和输出量之间的关系可以用线性函数表示，线性电路是指完全由线性元件、独立源或线性受控源构成的电路。线性电路的齐次性是指当激励信号（某独立源的值）增加或减少 K 倍时，电路的响应（即在电路其他各电阻元件上所建立的电流和电压值）也将增加或减少 K 倍。

电压源：是一个理想电路元件，它的端电压与通过元件的电流无关，总保持为给定的时间函数，而电流的大小则由外电路决定。

电流源：也是一个理想电路元件，它发出的电流与元件的端电压无关，总保持为给定的时间函数，而端电压的大小则由外电路决定。

2. 基尔霍夫定律符号规则

(1) 流出节点的电流取正号 (+)，流入节点的电流取负号 (-)。

(2) 凡支路电压参考方向与回路绕行的正方向相同者，电压取正号 (+)，反之电压取负号 (-)。

3. 基本规律

基尔霍夫电流定律 (KCL)：集中参数电路中，在任一时刻，流出（流入）任一节点的电流的代数和等于零。数学表达式为：

$$\sum i = 0$$

实验过程中，通过测量流入与流出某指定节点的电流大小与方向，按其符号规则 (1)，求其代数和。

基尔霍夫电压定律 (KVL)：集中参数电路中，任一闭合回路上全部组件端的电压代数和等于零。数学表达式为：

$$\sum u = 0$$

实验过程中，通过测量某一回路中各支路的电压大小与方向，按其符号规则 (2)，求其代数和。

叠加定理：对于一个具有唯一解的线性电路，由几个独立电源共同作用所形成的各支路电流或电压，等于各个独立电源单独作用时在相应支路中形成的电流或电压的代数和。不起作用的电压源所在的支路应（移开电压源后）短路，不起作用的电流源所在的支路应开路。

四、实验设备（见表 1-1-1）

表 1-1-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装置	DGJ-01	1	实验平台
2	直流稳压电源	+6 V、+12 V 切换	1	电源区
3	可调直流稳压电源	0~30 V	1	电源区
4	数字万用表	VC890D	1	备用
5	直流数字电压表	0~300 V	1	仪表区
6	直流数字毫安表	0~500 mA	1	仪表区
7	电路基本实验箱	基尔霍夫定理/叠加定理模块	1	DGJ-03 挂件

五、实验内容与基本步骤

1. 验证基尔霍夫电流定律

实验线路如图 1-1-1 所示，是一个有 2 个电压源的二网孔直流线性电路。

(1) 实验前先任意设定 3 条支路的电流参考方向与回路方向，如图 1-1-1 所示。

(2) 分别将两路直流稳压电源接入电路（一路 E_1 为 +6 V、+12 V 切换电源，另一路 E_2 为 0~30 V 可调直流稳压源），设定 $E_1 = 6\text{ V}$ ， $E_2 = 12\text{ V}$ 。

(3) 熟悉电流插头的结构，将电流插头的两端接至直流数字毫安表的“+、-”两端。

(4) 将电流插头分别插入 3 条支路的 3 个电流插座中，读出电流值并将其记入实验报告中的表 1-1-1 中。

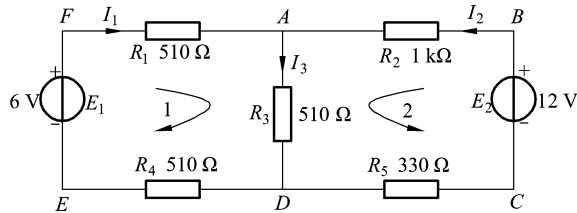


图 1-1-1

2. 验证基尔霍夫电压定律

(1) 用直流数字电压表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值并将其记入实验报告中的表 1-1-2 中。

(2) 测量电位与电压，并验证电压与参考点的选择无关。分别以 B 点和 D 点为参考点，测量 A 、 B 、 C 、 D 各点电位并将其记入实验报告中的表 1-1-3 中，计算电压值记入实验报告中的表 1-1-3 中。

3. 验证叠加定理

(1) 分别在 E_1 单独作用时（将开关 S_1 投向 E_1 侧，开关 S_2 投向短路侧）、 E_2 单独作用时

(将开关 S_1 投向短路侧开关 S_2 投向 E_2 侧), 及 E_1 和 E_2 共同作用时 (将开关 S_1 投向 E_1 侧, S_2 投向 E_2 侧), 用直流数字电压表和毫安表 (接电流插头) 测量各支路电流及电阻元件两端的电压, 数据记入实验报告中的表 1-1-4 中。

六、实验注意事项

- (1) 所有需要测量的电压值, 均以电压表测量的读数为准, 不以电源表盘指示值为准。
- (2) 防止电源两端碰线短路。
- (3) 若用数字式电流表进行测量, 要识别电流插头所接电流表的 “+” “-” 极性。

七、思考题

1. 电位参考点的电位值一定为零吗? 对其他任意两点之间的电压有影响吗?
2. 叠加原理中 E_1 、 E_2 分别单独作用时, 在实验中应如何操作? 可否将不作用的电源 (E_1 或 E_2) 置零 (短接)?

实验二 有源二端网络的等效参数及变换研究

一、实验基本任务

- (1) 测量电压源的外特性曲线, 验证电压源与电流源等效变换关系;
- (2) 测定有源二端网络等效参数;
- (3) 研究实际电源的功率输出特性。

完成任务: (1) 的满分为 50 分, (1) + (2) 的满分为 90 分, (1) + (2) + (3) 的满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 掌握电压源、有源二端网络外特性曲线的测量方法;
- (2) 掌握有源二端网络等效参数的测试方法;
- (3) 了解电路 “匹配” 条件。

三、实验原理

1. 基本概念

1) 理想电压源

理想电压源的端电压 $u(t)$ 与通过元件的电流无关，总保持为给定的时间函数，等于电压源的激励电压 $u_s(t)$ ，即 $u(t) = u_s(t)$ 。理想电压源输出的电流由外电路决定。电压源不接外电路时，电流总为零，这种情况称为“电压源处于开路”。而把电压源短路是没有意义的。理想电压源图形符号如图 1-2-1 (a) 所示。

2) 理想电流源

理想电流源发出的电流 $i(t)$ 与通过元件的端电压无关，总保持为给定的时间函数，等于电流源的激励电流 $i_s(t)$ ，即 $i(t) = i_s(t)$ 。理想电流源的端电压由外电路决定。电流源两端短路时，其端电压为零，电流等于电流源的激励电流。把电流源开路是没有意义的。理想电流源的图形符号如图 1-2-1 (b) 所示。

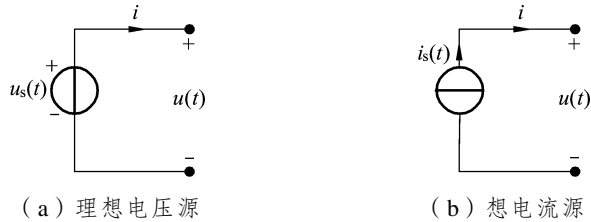


图 1-2-1 理想电源模型

3) 实际电源

实际电源的端电压与输出的电流都是随着外部负载的变化而变化的，但是就其外部的特性而言，它既可以看成一个理想电压源与一个电阻（内电阻）串联而成，也可以看成一个理想电流源与一个电导并联而成。如果这两种电源能向同样大小的负载供出同样大小的电流和端电压，即使得具有相同的外部特性，则称这两电源等效。如图 1-2-2 (a)、1-2-2 (b) 所示。

电源等效变换条件： $i_s = \frac{u_s}{R_0}$ ， $g_0 = \frac{1}{R_0}$ ；或 $u_s = i_s R_0$ ， $R_0 = 1/g_0$ 。

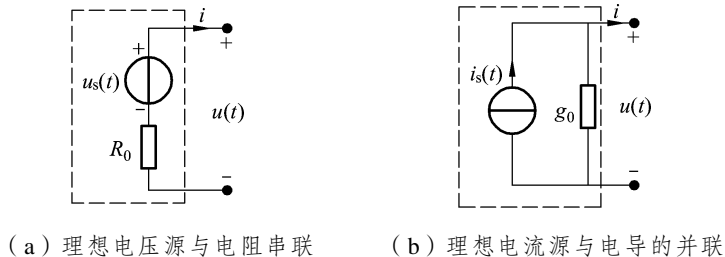


图 1-2-2 实际电源模型

4) 受控电源

受控电源又称非独立电源，受控电源的激励电压或受控电源的激励电流受电路中某部分电压或电流的控制。可分为四种情况：受电压控制的电压源（VCVS）与电流源（VCCS），受电流控制的电压源（CCVS）与电流源（CCCS）。

5) 有源二端网络

任何一个线性含源网络，如果仅研究其中一条支路（如图 1-2-3 中的 R_L 支路）的电压和电流，则可将电路的其余部分看作一个有源二端网络（或称为含源一端口网络）。

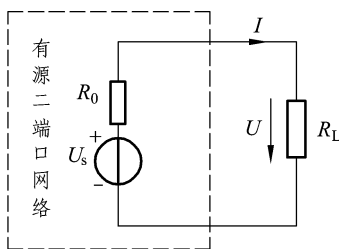


图 1-2-3 有源二端网络

2. 实际电压源的外特性

电压源外特性测试电路如图 1-2-4 (b) 所示，令外部负载电阻为 $R_L = R_1 + R_2$ ，若不计电流表的表头内阻且认为电压表的内阻为无穷大，则实际电压源的外特性为

$$U = U_s - IR_L$$

3. 戴维南定理

任何一个线性有源网络，总可以用一个电压源与一个电阻的串联来等效代替，此电压源的电动势 U_s 等于这个有源二端网络的开路电压 U_{oc} ，其等效内阻 R_0 等于该网络中所有独立电源均置零（理想电压源视为短接，理想电流源视为开路）时的等效电阻。

4. 诺顿定理

任何一个线性有源网络，总可以用一个电流源与一个电阻的并联组合来等效代替，此电流源的电流 I_s 等于这个有源二端网络的短路电流 I_{sc} ，其等效内阻 R_0 定义同戴维南定理。

其中 U_{oc} (U_s) 和 R_0 或者 I_{sc} (I_s) 和 R_0 称为有源二端网络的等效参数。

5. 有源二端网络等效参数的测量方法

1) 开路电压、短路电流法测 R_0

将有源二端网络输出端开路，用电压表直接测量其输出端的开路电压 U_{oc} ，然后再将其输出端短路，用电流表测其短路电流 I_{sc} ，则其等效内阻为：

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

本方法简单，但内阻很小时不宜使用。

2) 伏安法测 R_0

用电压表与电流表测出有源二端网络的外特性曲线，求出曲线斜率，则内阻为：

$$R_0 = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

3) 半电压法测 R_0

当负载电压为被测网络开路电压的一半时，此时负载电阻的值即等于等效内阻值。

4) 零示法测开路电压 U_{oc}

在测量高内阻的有源二端网络的开路电压时，可以用一个低内阻的可调稳压电源与之进行对接，中间加一个电压表，调节可调稳压电源电压，使电压表读数为零，此时稳压电源的开路电压即等于有源二端网络的开路电压。

6. 负载获得最大功率的条件

如图 1-2-3 所示，一个电源（或有源二端网络）向负载输送电能的功率为 $P = I^2 R_L$ 。

当满足条件 $R_L = R_0$ 时（称为电路“匹配”），负载从电源获得的最大功率，为 $P_{\max} = \frac{U}{4R_L}$ 。

在电路处于“匹配”状态时，电源本身要消耗一半的功率，此时，电源的效率只有 50%，这对于电力系统是绝对不允许的。但在电子技术中，信号源本身的功率较小，且内阻较大，希望信号源有最大的功率输出，这时就要讨论阻抗的“匹配”问题。

四、实验设备（见表 1-2-1）

表 1-2-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装置	DGJ-01	1	实验平台
2	可调直流稳压电源	0~30 V	1	调到 6 V
3	可调直流恒流源	0~200 mA	1	调到 10 mA
4	数字万用表	VC890D	1	备用
5	直流数字电压表	0~300 V	1	仪表区
6	直流数字毫安表	0~500 mA	1	仪表区
7	电路基本实验箱	戴维南定理/诺顿定理模块	1	DGJ-03

8	元件箱	51 Ω、200 Ω 固定电阻、0-99999.9 Ω 可调电阻箱、1 kΩ/2W 可调电位器	1	DGJ-05
---	-----	---	---	--------

五、实验内容与基本步骤

1. 测定直流稳压电源（近似理想电压源）与实际电压源的外特性

实验电路分别如图 1-2-4 (a) 与 1-2-4 (b) 所示，其中 R_1 为实验保护电阻， R_2 为可调电阻， R_0 为模拟电压源内阻。令 R_2 的阻值由大至小变化，将电压表与电流表的读数记入实验报告中的表 1-2-1 与表 1-2-2 中，并用坐标纸作出曲线，得到结论。

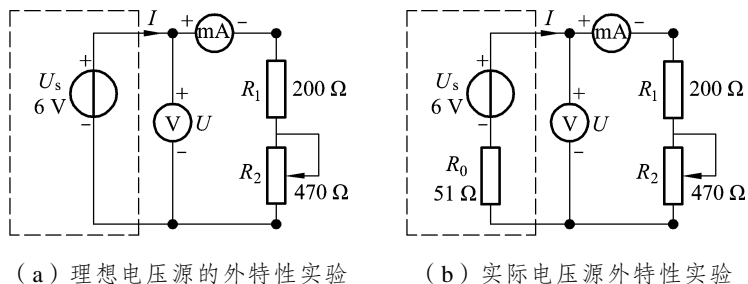


图 1-2-4 电压源外特性测试电路

2. 验证电压源与电流源的等效变换关系

先按图 1-2-5 (a) 线路接线，将线路中两表的读数记入实验报告中的表 1-2-3。再将电路接成图 1-2-5 (b)，调节电流源的输出电流，使两表的读数与图 1-2-5 (a) 时的数值相等。将 I_s 的值记入实验报告中的表 1-2-3，用公式验证等效变换的正确性。

$$I_s = \frac{U_s}{R_0}, \quad g_0 = \frac{1}{R_0} \text{ 或 } U_s = I_s R_0, \quad R_0 = 1/g_0$$

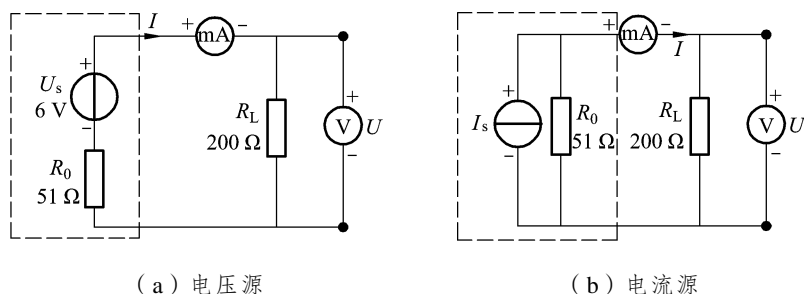


图 1-2-5 电压源与电流源的等效变换测试电路

3. 有源二端网络等效参数的测定

被测有源二端网络如图 1-2-6 (a) 所示。戴维南等效电路图为 1-2-6 (b) 所示。

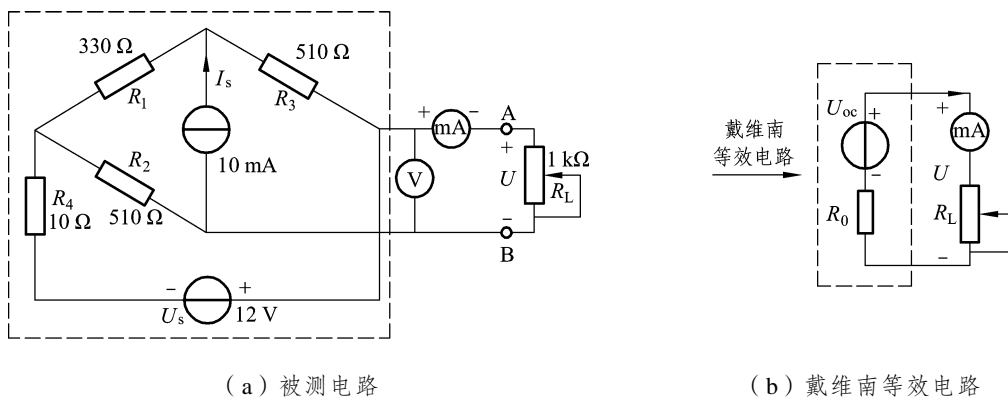


图 1-2-6 有源二端网络的等效参数测试电路

(1) 直接用数字万用表测开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} ，求出内阻 R_0 。

按图 1-2-6 (a) 所示接入稳压电源 $U_s = 12\text{V}$ 和恒流源 $I_s = 10\text{mA}$ ，不接入 R_L 。测出 U_{oc} 和 I_{sc} ，并计算出 $R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$ （测 U_{oc} 时，不接入毫安表）。数据记入实验报告中的表 1-2-4 中。

(2) 测量有源二端网络的外特性曲线。

按图 1-2-6 (a) 所示接入 R_L 。改变 R_L 阻值，测量相应的 U 和 I ，将测量数据记入实验报告中的表 1-2-5 中，并依据表中的数据用坐标纸作出有源二端网络的外特性曲线。

(3) 有源二端网络等效电阻的直接测量法。

一般地，对理想电压源，先将其去掉，再将原电压源所接的两点用一根短路导线相连。对理想电流源，直接去掉。对于实际电源，可用一个等于其电源内阻的电阻代替。

断开负载两端，用万用表的欧姆档直接测定。

本实验电路中，应先去掉电压源与电流源，再用导线将电压源原接线的两点直接短接，断开负载 R_L 两端，用万用表的欧姆档直接测量，得到的电阻即为有源二端网络的等效电阻。

4. 最大功率传输条件测定

按图 1-2-7 接线，改变负载电阻的值，测量输出的电流与电压，记入实验报告中的表 1-2-6 中。

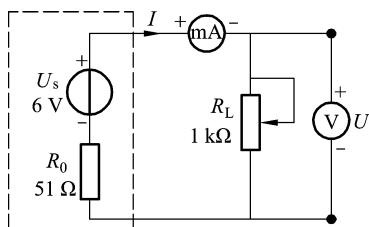


图 1-2-7 电源输出功率与负载的关系

六、报告要求

- (1) 测定直流稳压电源与实际电压源的外特性并作出特性曲线。
- (2) 比较电压源与电流源当负载相同、输出电压和电流相等时，测量的电流源电流是否满足等效变换关系。如有误差，请分析产生的原因。
- (3) 用多种方法测量有源二端网络的等效电阻、开路电压及短路电流。
- (4) 验证电源输出最大功率的条件。

七、实验注意事项

- (1) 测量过程中不能将电压源直接短路。
- (2) 换接线路时，必须关闭电源开关。
- (3) 在测量电压源外特性时，要测量空载时的电压值（即开路电压）。

实验三 一阶、二阶网络响应特性研究

一、实验基本任务

- (1) 观察 RC 一阶电路的响应特性曲线并测定时间常数；
- (2) 观察 RLC 二阶电路三种状态下的零状态响应与零输入响应；
- (3) 测量 RLC 二阶电路在欠阻尼时的衰减常数与振荡频率。

完成任务：(1) 的满分为 70 分，(1) + (2) 的满分为 90 分，(1) + (2) + (3) 的满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 学会用示波器观察 RC 电路的零状态响应（充电）与零输入响应（放电）特性曲线；
- (2) 掌握用示波器测量 RC 微分与积分电路时间常数的方法；
- (3) 了解二阶电路的组成与响应特点；
- (4) 学习用双踪示波器测量周期与振幅；
- (5) 了解测量欠阻尼时衰减常数与振荡频率的测量方法。

三、实验原理

1. 基本概念

(1) 动态元件与动态电路：电容元件和电感元件的电压和电流的约束关系通过导数（或积分）表达的，称这为动态元件，又称为储能元件。含有动态元件的电路称为动态电路。含有一个动态元件的电路称为一阶电路，含有 2 个或 N 个动态元件的电路称为二阶或 N 阶电路。对应的电路方程为一阶、二阶或 N 阶微分方程。

(2) 零输入响应：动态电路中无外加激励电源，仅由动态元件初始储能所产生的响应。这种响应随时间按指数规律衰减。

(3) 零状态响应：电路的储能元器件（电容、电感类元件）无初始储能，仅由外部激励作用而产生的响应。

(4) 过渡过程：动态电路中的结构或元件的参数发生改变时（例如电路中的电源或无源元件的断开或接入，信号的突然注入等），电路的工作状态由原来的稳定状态转变到另一个稳定状态，这种转变往往需要经历一个过程，被称为动态过程，在工程上称为过渡过程。

过渡过程是单次变化过程而且很短暂，为了用示波器观察过渡过程和测量有关的参数，可以利用信号发生器输出的方波来模拟阶跃激励信号。即令方波输出的上升沿作为零状态响应的正阶跃激励信号，方波下降沿作为零输入响应的负阶跃激励信号。只要选择方波的重复周期远大于电路的时间常数 τ ，电路在这样的方波序列脉冲信号的激励下，其过渡过程与接通和断开直流电源是基本相同的。

2. 基本动态元件与 VCR 方程

(1) 电容器：是由两个金属电极及其间的介电材料（如云母、绝缘纸、空气等）构成的。当在两极板上加上电压后，两极板上分别聚集起等量的正、负电荷，并在介质中建立电场而具有电场能量。电容器储存电量多少的能力称为电容器的电容量，单位为法拉（F）。一般地，电容量的大小与极板面积和介电材料的介电常数 ε 成正比，与介电材料厚度（即极板间的距离）成反比。电容器中储存的电量 Q 等于电容量 C 与电极间的电位差 U 的乘积。电容元件就是反映这种物理现象的电路模型。

(2) 电感线圈：是用绝缘导线（例如漆包线、纱包线等）绕制成空心或带有磁心、铁芯等的一组串联的同轴线匝。当线圈通过变化的电流后，在线圈中就会形成变化的感应磁场，变化的感应磁场又会产生感应电流来抵制线圈中电流的变化。这种电流与线圈的相互作用关系称为电的感抗，也就是电感，单位是亨利（H）。

(3) VCR 方程：是某一元件的电压与电流之间的关系。

电容元件： $i = C \frac{du}{dt}$ ，或 $u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt$ ，写成相量式为： $\dot{U} = \frac{1}{j\omega C} \dot{i}$ 。

电感元件： $u = L \frac{di}{dt}$ 或 $i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_0^t u dt$ ，写成相量式为： $\dot{U} = j\omega L \dot{i}$ 。

电阻元件： $u = iR$ ，写成相量式为： $\dot{U} = \dot{i}R$ 。

3. 典型的一阶电路

1) RC 积分电路

实现积分电路的方法很多，最简单的组成方法是由满足一定条件的 RC 串联电路构成。如图 1-3-1 (a) 所示，由 C 两端的电压作为响应输出，且当电路的参数满足 $\tau = RC \gg T/2$ 时，则该 RC 电路称为积分电路。此时电路的输出信号电压与输入信号电压的积分成正比。利用积分电路可以将方波转变成三角波。

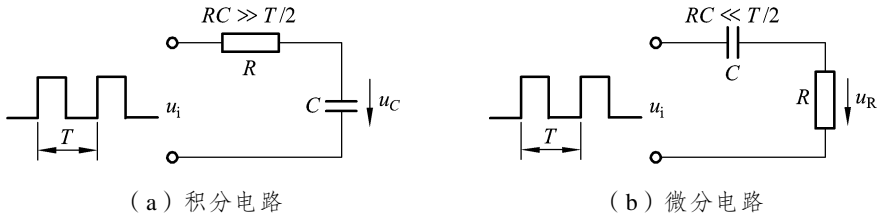


图 1-3-1 RC 积分电路与微分电路

2) RC 微分电路

微分电路也可以与积分电路一样用 R、C 串联电路构成，但有两个关键的不同点：一是电路的电容与电阻比积分电路要小，要求满足 $\tau = RC \ll T/2$ ；二是响应输出是取电阻两端的电压。

如图 1-3-1 (b) 所示，在方波序列脉冲的重复激励下，当满足 $\tau = RC \ll T/2$ (T 为方波脉冲的重复周期) 且由 R 两端的电压作为响应输出时，该电路就是一个微分电路。此时电路的输出信号电压与输入信号电压的微分成正比。利用微分电路可以将方波转变成尖脉冲。

3) RC 电路的时间常数 τ

电路的时间常数是表示电路过渡过程快慢的一个量。对零输入响应电路，时间常数 τ 是输出信号由最大值衰减到原来的 0.368 倍 ($1/e$) 时所用的时间。对零状态响应电路，时间常数 τ 是指输出信号由零增加到最大值的 0.632 倍 ($1 - 1/e$) 所用的时间。对于一阶微分电路，在方波 ($T \gg RC$) 输入时，电容充放电的波形曲线如图 1-3-2 所示。理论证明，一阶积分与微分电路的时间常数均为 $\tau = RC$ 。

4. 典型的二阶电路

含有 2 个动态元件的电路称为二阶电路。二阶电路可以用二阶微分方程进行描述。最简单的二阶电路是 RLC 串联电路和 RLC 并联电路，如图 1-3-3 所示。由于给定的初始条件应有两个，它们由储能元件的初始值决定。所以，其动态响应特性有许多种。一个二阶电路在方波正、负阶跃信号的激励下，可获得零状态与零输入响应。下面仅就其中的一种情况进行研究。

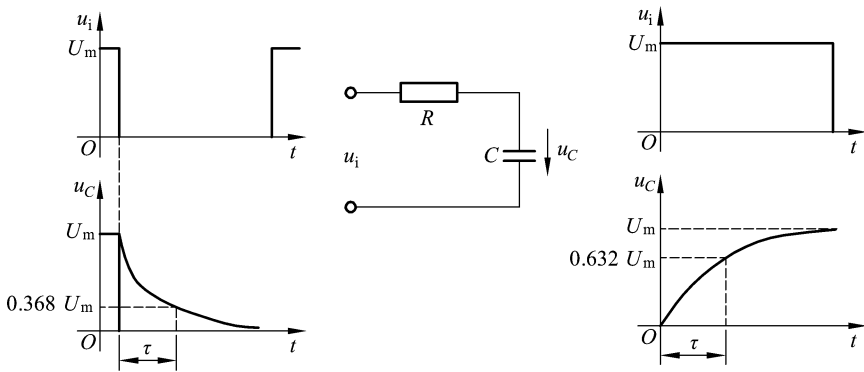
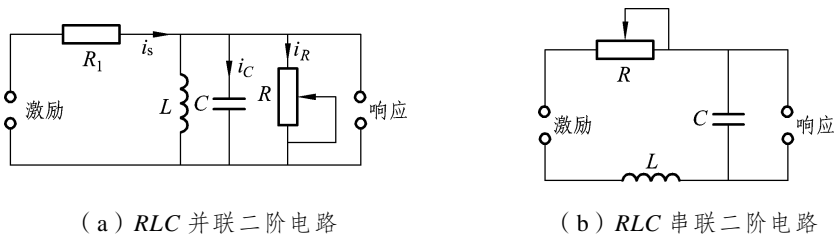


图 1-3-2 一阶电路的时间常数



(a) RLC 并联二阶电路

(b) RLC 串联二阶电路

图 1-3-3 典型二阶电路

1) RLC 并联二阶动态电路

如图 1-3-3 (a) 所示, 由 RLC 并联构成一个二阶电路。其中 R_1 为隔离电阻, 函数信号发生器提供方波信号, 在方波正、负阶跃信号的激励下, 可获得零状态与零输入响应。

电路的响应方程为:

$$LC \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{L}{R} \frac{di_L}{dt} + i_L = i_s$$

特征方程为: $P^2 + \frac{1}{RC}P + \frac{1}{LC} = 0$

微分方程的特征方程的根为: $P_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$

令: $\frac{1}{2RC} = \sigma$ (σ 称为衰减系数)

$\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$ (ω_0 称为固有振荡角频率)

$\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC}\right)^2 = \omega_d^2$ (ω_d 称为振荡角频率)

则特征方程的根可表示为: $P_{1,2} = -\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 - \omega_0^2}$

RLC 并联二阶动态电路的响应变化轨迹由电路的二阶常微分方程的特征根决定。

当调节电路的元件参数值，使电路的特征根分别为两个不相等的负实根（ $R < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ ）、一对实部为负的共轭复数根（ $R > \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ ）及一对相等的负实根（ $R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ ）时，在实验中可获得过阻尼、欠阻尼和临界阻尼三种响应图形。图 1-3-4 所示为欠阻尼状态下，方波输入时的响应波形。

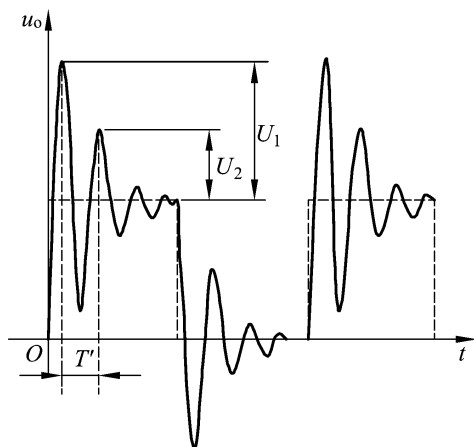


图 1-3-4 RLC 并联二阶响应欠阻尼状态下的输出波形

从波形中测得欠阻尼振荡的周期 T' 与相邻周期的振幅 U_1 与 U_2 ，则可求出衰减常数 α 与振荡频率 ω_d 。

四、实验设备（见表 1-3-1）

表 1-3-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装置	DGJ-01	1	实验平台
2	数控智能函数信号发生器	$f = 1 \text{ kHz}$ ，占空比为 1 : 1	1	含频率计
3	双踪示波器	GDS-1052，50 MHz	1	备用
4	电路基本实验箱	一阶、二阶动态电路模块	1	DGJ-03

五、实验内容与基本步骤

1. RC 一阶电路的响应特性测试

动态电路实验板的元件如图 1-3-5 所示，请认清 R 、 C 元件的布局及其标称值，以及各开关的通断位置等。

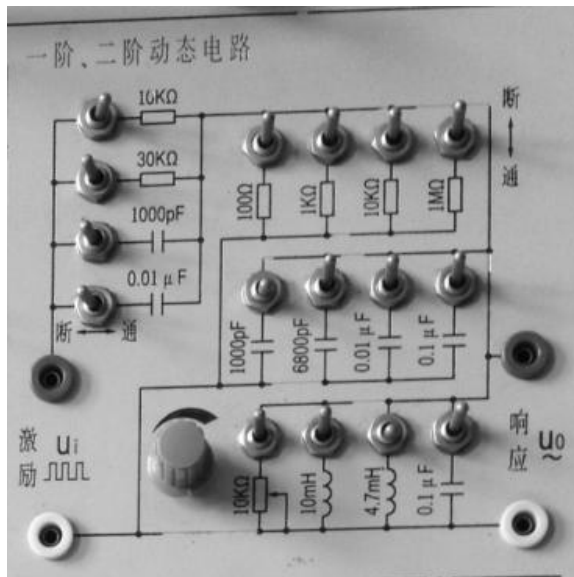


图 1-3-5 一阶二阶动态电路面板

(1) 测定 RC 一阶电路的时间常数。

从电路板上选 $R = 10\text{ k}\Omega$, $C = 6\ 800\text{ pF}$ 组成如图 1-3-2 所示的 RC 一阶充放电电路。 u_i 为由信号发生器输出的 $U_{p-p} = 3\text{ V}$ 、 $f = 1\text{ kHz}$ ($T = 1\text{ ms}$) 的方波电压信号, 用两根同轴电缆线将激励源 u_i 和响应信号 u_c 分别连接至数字示波器的两个输入口 Y_A 和 Y_B 。这时从示波器的屏幕上可以观察到激励与响应的变化规律, 并且可以从示波器上直接测出时间常数 τ (测量方法见示波器使用说明书)。

改变电容值为 $C = 1\ 000\text{ pF}$, 定性地观察对响应的影响, 并将结果记录到实验报告中的表 1-3-1 中。

(2) 用示波器观察积分电路对方波的作用效果。

选 $R = 10\text{ k}\Omega$, $C = 0.1\ \mu\text{F}$, $\tau_{理} = 1\text{ ms}$, 组成如图 1-3-1 (a) 所示的积分电路。记录波形图到实验报告中的表 1-3-2 中。

(3) 用示波器观察微分电路对方波的作用效果。

选 $R = 100\ \Omega$, $C = 0.01\ \mu\text{F}$, $\tau_{理} = 0.001\text{ ms}$, 组成如图 1-3-1 (b) 所示的微分电路。观测并记录激励与响应的波形到实验报告中的表 1-3-1 中。

2. RLC 并联二阶动态电路响应特性测试

(1) 连接电路与选择激励信号。

利用一阶、二阶动态电路实验板中的元件与开关配合作用, 组成如图 1-3-3 所示的 RLC 并联电路。其中, $R_1 = 10\text{ k}\Omega$, $L = 4.7\text{ mH}$, $C = 1\ 000\text{ pF}$, R 为 $10\text{ k}\Omega$ 的可调电阻。

激励源 u_s 为方波信号, 由函数信号发生器输出, $U_{p-p} = 1.5\text{ V}$, $f = 1\text{ kHz}$ ($T = 1\text{ ms}$), 通过同轴电缆线将 u_s 接到激励端, 同时将激励源 u_s 和响应 u_o 的信号分别连接至数字示波器的两个输入口 Y_A 和 Y_B 。

(2) 观察三种状态时的响应曲线。

调节可变电阻器 R 之值, 观察二阶电路的零输入响应和零状态响应由过阻尼过渡到临界阻尼, 最后过渡到欠阻尼的变化过程, 分别定性地描绘、记录响应的典型变化波形到实验报告中的表 1-3-1 中。

(3) 测定欠阻尼时的衰减常数和振荡频率。

调节可变电阻器 R , 使示波器屏上呈现稳定的欠阻尼响应波形, 分别测量图 1-3-4 所示波形图中的欠阻尼振荡的周期 T' 与相邻周期的振幅 U_1 与 U_2 , 则可求出衰减常数 α 与振荡频率 ω_d 。计算公式为 $\omega_d = 2\pi/T'$, $\alpha = \frac{1}{T'} \ln \frac{U_2}{U_1}$, 将相关数据记入实验报告中的表 1-3-3 中。

(4) 衰减常数和振荡频率与电路参数的关系。

改变一组电路参数, 重复上述步骤 (3), 测量对应的衰减常数 α 与振荡频率 ω_d 。将相关数据记入实验报告中的表 1-3-3 中。

六、实验注意事项

- (1) 实验前, 进一步了解双踪示波器的使用方法, 可从信号源直接输入信号进行调节。
- (2) 信号源与示波器的接地线要连在一起 (共地)。
- (3) 实验中的电路较多, 要按顺序一步一步做。
- (4) 观察双踪时, 显示要稳定, 如不同步, 则可采用外同步触发方式。

实验四 正弦稳态交流电路研究

一、实验基本任务

- (1) 测定正弦稳态交流 RC 电路中各电压、电流相量之间的关系;
- (2) 连接日光灯线路, 并测量电压、电流、功率与功率因数;
- (3) 实现日光灯电路功率因数的提高。

完成任务: (1) 的满分为 60 分, (1) + (2) 的满分为 90 分, (1) + (2) + (3) 的满分为 100 分

二、实验目的与要求

- (1) 学会根据电路原理图正确连接测量电路;
- (2) 会用电工仪表测量交流电压、电流、功率和功率因数;
- (3) 了解正弦稳态电路中电压、电流相量之间的相位关系;

(4) 通过日光灯电路，了解功率因数的意义与改善方法。

三、实验原理

1. 基本概念

1) 正弦稳态电路

线性时不变动态电路在角频率为 ω 的正弦电压源或电流源激励下，随着时间的增长，当暂态响应消失，只剩下正弦稳态响应，电路中全部电压、电流都是角频率为 ω 的正弦波时，称电路处于正弦稳态。满足这类条件的动态电路通常称为正弦交流电路或正弦稳态电路。

2) 相量法

相量法是分析正弦稳态电路的一种简单易行的方法。正弦电压量 $u = \sqrt{2}U \cos(\omega t + \phi_u) = U_m \cos(\omega t + \phi_u)$ 与正弦电流量 $i = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \phi_i) = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$ ，分别用相量表示为 $\dot{U} = Ue^{j\phi_u} = U \angle \phi_u$ 、 $\dot{I} = Ie^{j\phi_i} = I \angle \phi_i$ 。其中 U 、 I 分别为电压与电流的有效值； $U_m = \sqrt{2}U$ ， $I_m = \sqrt{2}I$ 对应于电压与电流的最大值； ω 为正弦电压与电流的角频率； ϕ_u 、 ϕ_i 分别为电压与电流的初相位； $\omega t + \phi_u$ 、 $\omega t + \phi_i$ 分别为电压与电流的在 t 时刻的相位。相量在复平面表示的图形称为相量图，如图 1-4-1 所示。

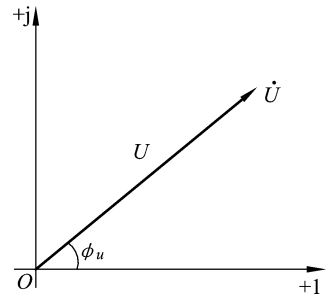


图 1-4-1 相量 \dot{U} 的相量图

KCL 方程的相量表示为： $\sum \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dots + \dot{I}_k + \dots = 0$

KVL 方程的相量表示为： $\sum \dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3 + \dots + \dot{U}_k + \dots = 0$

3) 电阻 R 、电感 L 和电容 C 的电流与电压的相量关系

电阻：VCR 的相量表示为 $\dot{U} = R\dot{I}$ ，电压与电流同相。

电感：VCR 的相量表示为 $\dot{U} = j\omega L\dot{I}$ ，电流不能突变，先有电压后有电流，电压超前电流 90° 。

电容：VCR 的相量表示为 $\dot{U} = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I} = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}$ ，电压不能突变，先有电流后有电压，电压滞后电流 90° 。

实验时，通过双踪示波器分别测量电压与电流信号，可直接观察到二者的相位差。

4) 阻 抗

一端口的端电压相量 \dot{U} 与电流相量 \dot{I} 的比值定义为一端口的阻抗 Z ，欧姆定律可写为： $\dot{U} = Z\dot{I}$ 。在具有电阻、电感和电容的电路里，阻抗常用 $Z = R + jX$ 表示，是一个复数（不是正弦量，不能在其上加“ \cdot ”），又称为复阻抗。实部称为电阻 R ，虚部称为电抗 X 。当 $X > 0$ 时， Z 称为感性阻抗；当 $X < 0$ 时， Z 称为容性阻抗，单位均为欧姆 (Ω)。

电感与电容在电路中对交流电所起的阻碍作用分别称为感抗 $X_L = \omega L$ 与容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ，电

容和电感串联时的总阻抗称为电抗 $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ 。

5) 电阻 R 、电感 L 和电容 C 的阻抗与频率的关系

在正弦信号作用下, R 、 L 、 C 的阻抗与频率的特性曲线如图 1-4-2 所示。

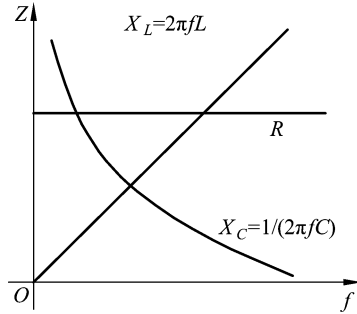


图 1-4-2 R 、 L 、 C 元件的阻抗与频率特性曲线

实验时, 改变激励电压信号的频率, 并保持激励电压信号的有效值 U 不变, 测量通过元件的电流有效值 I , 则三种元件的阻抗大小分别为 $Z = U/I$ 。

6) 瞬时功率与平均功率 (有功功率)、视在功率与功率因数

瞬时功率: 一端口 N 吸收的瞬时功率 p 等于电压 u 和电流 i 的乘积, 即 $p = ui$ 。 p 往往是两个同频率正弦量的乘积, 是一个随时间作周期变化的非正弦周期量, 单位为瓦特 (W)。

平均功率 (有功功率): 平时电器标记的功率都是周期量的平均功率, 即 $P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$, 单位为瓦特 (W)。可以证明, 电阻的平均功率 $P_R = RI^2$, 电阻吸收功率; 电感与电容的平均功率 $P_L = P_C = 0$, 表示一段时间内吸收功率, 另一段时间内释放功率, 一个周期内吸收的功率为零。

视在功率: 视在功率为一端口上电压与电流有效值的乘积, 单位为伏安 (V·A), 即 $S = UI$ 。

功率因数: 功率因数为有功功率与视在功率之比, 即 $\cos \phi_z = \frac{P}{UI}$, 其中 $\phi_z = \arccos \frac{R}{|Z|}$ 称为阻抗角或功率因数角。

2. 正弦稳态 RC 电路中各电压、电流相量之间的关系

实验电路如图 1-4-3 所示, 通过测量灯泡、电容上的电压有效值, 验证电压三角形关系。由于电阻 (灯泡) 的电压与电流是同相的, 而电容的电压滞后电流 90° , 所以总电压滞后电流 ϕ , 如图 1-4-4 所示。

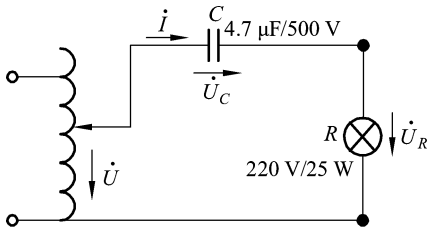


图 1-4-3 RC 串联电路

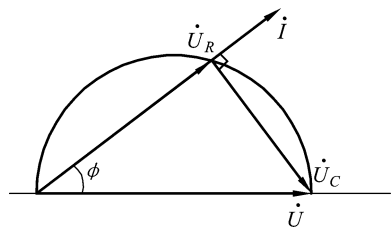


图 1-4-4 RC 串联电路电压三角形

在 50 Hz、220 V 的交流电，25 W 的白炽灯泡额定工作时的电阻为 $R_0 = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{25} = 1936 (\Omega)$ ，4.7 μF 电容器的容抗为 $X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314 \times 4.7 \times 10^{-6}} = 677.6 (\Omega)$ ，所以电路的总阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{1936^2 + (677.6)^2} = 2051 (\Omega)$$

对应的电压值分别为：

$$U_{R\text{理}} = \frac{R}{Z} U = \frac{1936}{2051} \times 220 = 207.7 (\text{V})$$

$$U_{C\text{理}} = \frac{X_C}{Z} U = \frac{677.6}{2051} \times 220 = 72.7 (\text{V})$$

3. 电感式日光灯电路及其工作原理

尽管目前多数日光灯采用电子式镇流器，但了解电感式镇流器组成的日光灯电路仍有重要意义。

电感式日光灯的结构如图 1-4-5 所示，K 闭合时，日光灯管不导电，全部电压加在启辉器两触片之间，使启辉器中氖气击穿，产生气体放电，此放电产生的一定热量使双金属片受热膨胀与固定片接通，于是有电流通过日光灯管两端的灯丝、启辉器和镇流器。短时间后双金属片冷却收缩与固定片断开，电路中电流突然减小；根据电磁感应定律，这时镇流器两端产生一定的感应电动势，使日光灯管两端产生 400 ~ 500 V 高压，灯管气体电离，产生放电，日光灯点燃发亮。日光灯点燃后，灯管两端电压降为 100 V 左右，这时由于镇流器的限流作用，灯管中电流不会过大。同时并联在灯管两端的启辉器也因电压降低而不能放电，其触片保持断开状态。日光灯工作后，灯管相当于一电阻 R ，镇流器可等效为电阻 R_L 和电感 L 的串联，启辉器断开，整个电路可等效为 R 、 L 串联电路，其电路模型如图 1-4-6 所示。

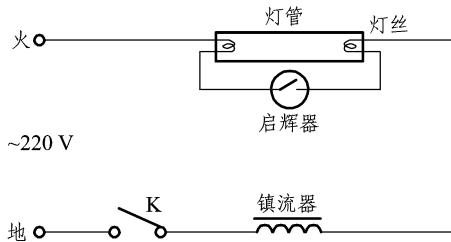


图 1-4-5 日光灯的结构

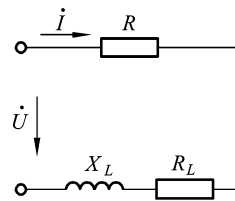


图 1-4-6 日光灯工作原理图

4. 功率因数的改善

由于电感式镇流器日光灯电路的阻抗为感性，为了提高功率因数，可以采用并联电容的方式，如图 1-4-7 所示（虚线部分为并联电容）。

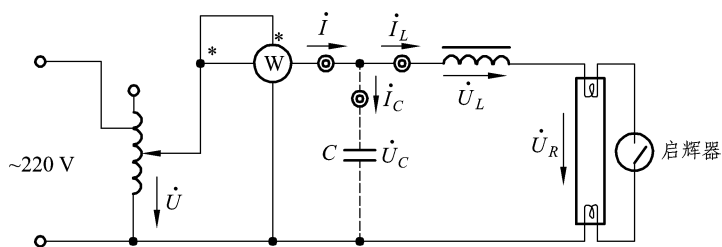


图 1-4-7 日光灯线路接线与功率因数改善电路

四、实验设备（见表 1-4-1）

表 1-4-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装置	DGJ-01	1	实验平台
2	交流电压表	0~500 V	1	仪表区
3	交流电流表	0~5 A	1	仪表区
4	智能功率、功率因数表	DGJ-06-1	1	
5	白炽灯、镇流器、启辉器、电流插座等	30 W 日光灯实验器件	各 1	DGJ-04
6	日光灯	30 W	1	屏内
7	电容器	1 μF, 2.2 μF, 4.7 μF/500 V	各 1	DGJ-05 元件箱

五、实验内容与基本步骤

1. 验证 RC 串联电路在正弦稳态时的电压三角形

利用交流电路实验箱 DGJ-4 中的三相负载模块与日光灯器件实验模块中的灯泡与电容,按图 1-4-3 所示连接好实验电路,电阻 R 用 220 V/25 W 的白炽灯泡,可并联多个,或采用不同功率的灯泡代替不同的电阻值。电容器为 4.7 μF/500 V。经指导教师检查后,接通实验台电源,电源通过自耦调压器调至交流 220 V。通过测量灯泡、电容上的电压有效值,验证电压直角三角形关系 $U^2 = U_R^2 + U_C^2$,与理论计算结果进行比较。将测量数据记入实验报告中的表 1-4-1 中。

2. 日光灯电路的接线与测量

利用交流电路实验箱 DGJ-4 中日光灯器件实验模块中的元件,按图 1-4-7 接线,经指导教师检查后接通实验台,调节自耦调压器的输出,使其输出电压缓慢增大,直到日光灯刚好启辉点亮为止,记下有功功率表读数 P 、用交流电压表测量调压器的输出电压 U 、用交流电流表测量日光灯的电流 I ,填入实验报告中的表 1-4-2 中。然后将电压调至 220 V,测量功率 P 、电流 I 及电压 U 、 U_L 、 U_R 填入表 1-4-2 中。

取下启辉器,试用短路方式启辉日光灯。

3. 并联电容改善功率因数

实验电路如图 1-4-7 所示，并接电容可取元件箱中的耐压值为 500 V 的电容。经指导教师检查后接通实验台，调节自耦调压器的输出至 220 V，记录功率表、电压表读数，通过一只电流表和三个电流插座分别测得三条支路的电流。改变电容值，进行三次重复测量，数据填入实验报告中的表 1-4-3 中。

六、实验注意事项

- (1) 本实验用交流市电 220 V，务必注意用电和人身安全，通电后一定要采用单手操作。
- (2) 功率表要正确接入电路。

实验五 RLC 谐振电路频率特性研究

一、实验基本任务

- (1) 测量 RLC 串联谐振电路的谐振频率与品质因数；
- (2) 测量 RLC 串联谐振电路的幅频特性曲线；
- (3) 测量 RLC 并联谐振电路的谐振频率。

完成任务：(1) 的满分为 60 分，(1) + (2) 的满分为 90 分，(1) + (2) + (3) 的满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 了解基本交流电路的频率特性；
- (2) 掌握 RLC 串联与并联谐振的谐振频率；
- (3) 理解电压谐振、电流谐振、品质因数、通频带等概念；
- (4) 会通过电路测量谐振频率、品质因数、通频带等。

三、实验原理

1. 基本概念

1) 频率特性

电路和系统的工作状态跟随频率而变化的现象，称为电路和系统的频率特性，又称为频率响应。

2) 网络函数

采用单输入（一个激励变量）-单输出（一个输出变量）的方式，在输入和输出变量之间建立函数关系，来描述电路的频率特性，这个函数关系就称为电路和系统的网络函数。即

$$H(j\omega) = \frac{\dot{R}_k(j\omega)}{\dot{E}_{sj}(j\omega)}$$

式中， $\dot{R}_k(j\omega)$ 为输出端口 k 的响应，为电压相量 $\dot{U}_k(j\omega)$ 或电流相量 $\dot{I}_k(j\omega)$ ； $\dot{E}_{sj}(j\omega)$ 为输入端口 j 的输入变量（正弦激励），为电压源相量 $\dot{U}_{sj}(j\omega)$ 或电流源相量 $\dot{I}_{sj}(j\omega)$ 。

2. 两种典型的交流电路

1) RLC 串联电路与频响曲线

如图 1-5-1 所示， RLC 串联电路由电阻 R 、电感 L 和电容 C 元件串联组成。根据相量法，电路的输入阻抗为：

$$Z(j\omega) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

由于串联电路中同时存在着电感和电容，两者的频率特性相反（感抗与 ω 成正比，而容抗与 ω 成反比），而且电抗角相差 180° ，所以可以肯定，一定存在一个角频率 ω_0 使感抗与容抗相互完全抵消，即 $X(j\omega_0) = 0$ 。阻抗 $Z(j\omega)$ 以 ω_0 为中心，在全频域内随频率变动的情况分为三个频区： $\omega < \omega_0$ 容性区， $\omega = \omega_0$ 电阻区， $\omega > \omega_0$ 感性区。容抗、感抗、阻抗随频率变化的频响曲线如图 1-5-2 所示。

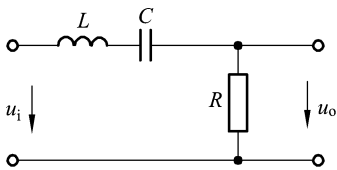


图 1-5-1 RLC 串联电路

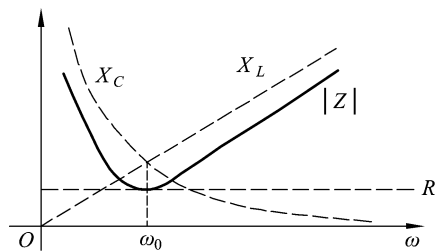


图 1-5-2 容抗、感抗与阻抗随频响曲线

2) RLC 并联电路与频响曲线

如图 1-5-3 所示， RLC 并联电路由电阻 R 、电感 L 和电容 C 元件并联组成，是与 RLC 串

联电路相对应的另一种电路。根据相量法，电路的输入导纳为

$$Y(j\omega) = G + j(B_C - B_L) = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

类似地，一定存在一个角频率 ω_0 ，使 RLC 并联电路的容纳与感纳相互完全抵消，即 $Y(j\omega_0) = G = 0$ 。阻抗 $Y(j\omega)$ 以 ω_0 为中心，在全频域内随频率变动的情况分为三个频区： $\omega < \omega_0$ 感性区， $\omega = \omega_0$ 电导区， $\omega > \omega_0$ 容性区。容纳、感纳、导纳随频率变化的频响曲线如图 1-5-4 所示。

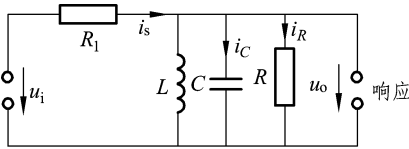


图 1-5-3 RLC 并联电路

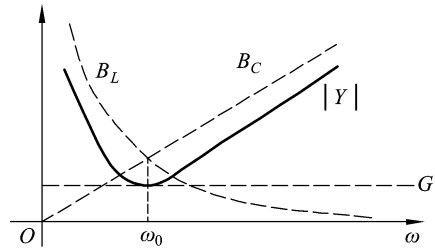


图 1-5-4 容纳、感纳与导纳随频响曲线

3. 谐振与谐振电路

在具有电阻 R 、电感 L 和电容 C 元件的交流电路中，电路两端的电压与电流的相位一般是不同的。如果调节电路元件 (L 或 C) 的参数或电源频率，可以使它们相位相同，使整个电路呈现为纯电阻性。电路达到这种状态时称之为谐振。能够实现谐振的电路称为谐振电路。谐振电路可分为串联谐振电路与并联谐振电路。

1) RLC 串联谐振

对于 RLC 串联电路，当 $\omega = \omega_0$ 时，整个电路呈现为纯电阻性，这时称之为串联谐振，又称为电压谐振。串联谐振时，电容与电感上的电压相位相反，其值均是电源电压的 Q (品质因数) 倍，所以电容与电感的耐压值必须超过电源最大值的 Q 倍。

2) RLC 并联谐振

对于 RLC 并联电路，当 $\omega = \omega_0$ 时，整个电路呈现为纯电导性，这时称之为并联谐振，又称为电流谐振。并联谐振时，电容与电感上的电流相位相反，其值是电源电流的 Q (品质因数) 倍，形成在电容与电感之间循环的大电流，这时电感线圈要足够粗，电容的性能要好。

本实验中通过改变电源频率来研究电路的幅频特性曲线。

4. RLC 串联谐振电路的特性曲线与特征参数

1) 幅频特性曲线 (谐振曲线)

若在图 1-5-1 所示的 RLC 串联电路中接入一个电压幅度一定、频率 f 连续可调的正弦交

流信号源，则电路中的容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ 、感抗 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 将随频率改变而变化，如图 1-5-2 所示。取电阻 R 上的电压 u_o 作为响应，当输入电压 u_i 的幅值保持不变时，在不同频率的信号激励下，测出 U_o 之值，就可反映出电路中电流 I （与 U_o 成正比）随 f 的变化。

实验中，以 f 为横坐标、 $\frac{U_o}{U_i}$ 为纵坐标（因 U_i 不变，故也可直接以 U_o 为纵坐标），绘出光滑的曲线，此即为幅频特性曲线，亦称谐振曲线，如图 1-5-5 所示。

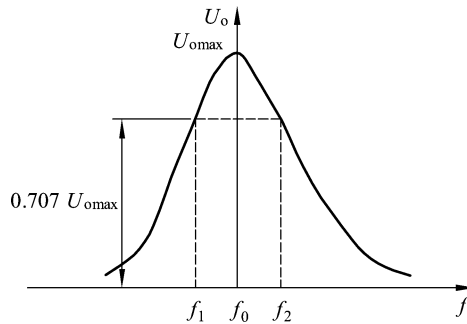


图 1-5-5 幅频特性曲线（谐振曲线）

2) 谐振频率 f_0

幅频特性曲线尖峰所对应的频率点称为谐振频率。理论上可计算出，当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时， $X_L = X_C$ ，此时电路呈纯阻性，电路阻抗的模为最小 $|Z| = R$ ，在输入电压 u_i 为定值时，电路中的电流达到最大值，且与输入电压 u_i 同相位。

3) 通频带宽度 BW

$$BW = f_2 - f_1$$

其中 f_2 和 f_1 是电路失谐时，输出电压的幅度下降到最大值的 $1/\sqrt{2} = 0.707$ 倍时所对应的上、下频率点，如图 1-5-5 所示。

4) 品质因数 Q

品质因数 Q 是反映谐振电路的固有性质的，由电路结构与参数决定。对于 RLC 串联谐振电路： $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 。

测量品质因数的方法很多，如电压法： $Q = \frac{U_L}{U_o} = \frac{U_C}{U_o}$ ，其中， U_L 、 U_C 和 U_o 为谐振时电感、电容与电阻上的电压。通频带法： $Q = \frac{f_0}{BW} = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$ 。

Q 值越大，曲线越尖锐，通频带越窄，电路的选择性越好。在恒压源供电时，电路的品

质因数、选择性与通频带只决定于电路本身的参数，而与信号源无关。

5. RLC 并联谐振电路的特性曲线与特征参数

1) 特性曲线（谐振曲线）

实验所用的 RLC 并联电路如图 1-5-3 所示， R_1 用于测量信号源的输出电流，实验中保持 R_1 上电压幅度一定（通过调节信号源输出电压）、连续调节信号源的频率 f ，则电路中的容纳 $B_C = \omega C = 2\pi fC$ 、感纳 $B_L = \frac{1}{\omega L} = \frac{1}{2\pi fL}$ 随之而变。对电导两端的电压进行测量与观察，以 f 为横坐标，以 U_o 为纵坐标，绘出光滑的曲线，此即为幅频特性曲线，亦称谐振曲线。与串联时完全相似。

2) 谐振频率 f_0

由并联谐振的条件，可得出当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时，电路呈纯阻性，输入导纳为最小值

$$Y(j\omega_0) = G + j\left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L}\right) = G, \text{ 或者说输入阻抗为最大值 } Z(j\omega_0) = R。$$

3) 品质因数 Q

对于 RLC 并联谐振电路： $Q = \frac{1}{G}\sqrt{\frac{C}{L}}$ 。

测量品质因数的方法很多，如电流法： $Q = \frac{I_L(\omega_0)}{I_s}$ ，其中， $I_L(\omega_0)$ 和 I_s 为谐振时电感上的电流与信号源的输出电流。

四、实验设备（见表 1-5-1）

表 1-5-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装置	DGJ-01	1	实验平台
2	函数信号发生器	数控智能函数信号发生器	1	正弦波输出
3	交流毫伏表	0 ~ 600 V	1	仪表区
4	频率计	数控智能函数信号发生器	1	
5	电阻、电容、电感元件	元件箱	各 1	DG-05
5	电路基本实验箱	RLC 串联谐振电路模块	1	DG-03

五、实验内容与基本步骤

1. 测量串联谐振电路的参数——谐振频率、品质因数

实验线路如图 1-5-6 所示，示波器用于监视信号源的输出电压保持不变 ($u_i = 4V_{p-p}$)。数字毫伏表用于测量输出电压与电感、电容的电压值。

(1) 按图 1-5-6 接好电路，其中 $C = 0.01 \mu F$ ， $L = 30 \text{ mH}$ ， $R = 200 \Omega$ 。将数字毫伏表接在电阻 R 两端。

(2) 将信号源的频率慢慢地由低向高调整，输出电压保持不变。当 U_o 的读数为最大时，读得频率计上的频率值即为电路的谐振频率 f_0 。

(3) 电路谐振时，将交流毫伏表分别接到电容与电感的两端测量电压 U_C 与 U_L ，(注意及时更换毫伏表的量限)。重复测两次，将数据填入实验报告中的表 1-5-1 中。

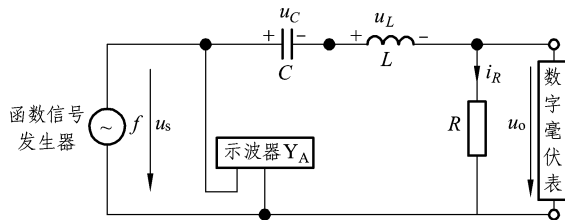


图 1-5-6 RLC 串联谐振电路

2. 测量串联谐振电路的特性曲线

在谐振点两侧，按频率递增或递减 500 Hz (谐振点附近) 或 1 kHz，依次取 8 个测量点，逐点测出 U_o 之值，其中第 5 点为 $U_{o,max}$ ，第 2 点与第 8 点为 $0.70U_{o,max}$ ，将数据记入实验报告中的表 1-5-2 中。

3. 测量并联谐振电路谐振频率

实验线路如图 1-5-7 所示。示波器用于监视信号源的输出电流保持不变 ($u_{R1} = 1V_{p-p}$)。数字毫伏表用于测量输出电压值。

(1) 按图 1-5-7 接好电路，其中 $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ， $C = 0.01 \mu F$ ， $L = 30 \text{ mH}$ ， $R = 200 \Omega$ 。将数字毫伏表接在电阻 R 两端。

(2) 将信号源的频率慢慢地由低向高调整，示波器上的电压波形保持不变。当 U_o 的读数为最大时，读得频率计上的频率值即为电路的谐振频率 f_0 。重复测量 3 次，将数据填入实验报告中的表 1-5-3 中。

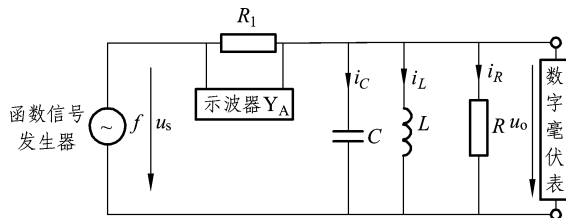


图 1-5-7 RLC 并联谐振电路

六、实验注意事项

- (1) 测量过程中示波器上的电压信号幅度要保持不变。
- (2) 测量谐振频率与品质因数时可多测几组求平均值。
- (3) 用数字式毫伏表进行测量时，要识别电流插头所接电流表的“+”“-”极性，在测量串联电路时，一定要注意更换量程（为什么？）。
- (4) 实验前可认真复习一下双踪示波器的使用方法。

实验六 三相负载特性与变压器特性研究

一、实验基本任务

- (1) 测量 Y-Y 联结下带中性线与不带中性线时，平衡与非平衡负载时各相电压、线电压、线电流及中（零）线电流；
 - (2) 测量 Y- Δ 联结时，平衡与非平衡负载时各相电压、线电压、线电流；
 - (3) 小型变压器的空载特性与外特性。
- 完成任务：(1) 的满分为 60 分，(1) + (2) 的满分为 90 分，(1) + (2) + (3) 满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 掌握三相电路的线电压与相电压、线电流与相电流及其在特定接法时的关系；
- (2) 掌握中性线对非平衡负载时的重要性；
- (3) 了解小型变压器的基本特性。

三、实验原理

1. 基本概念

(1) 三相电路：是一种特殊的交流电路，由三相电源、三相负载和三相输电线路组成。世界各国电力系统中电能的生产、传输与供电方式大都采用三相制。对称三相电源是由三相

发电机提供的，是三个等幅值、同频率、初相依次滞后 120° 的正弦电压源连接成星形（Y）或三角形（ Δ ）组成的电源。这三个电源依次称为 A 相、B 相和 C 相。我国三相系统电源频率为 $f = 50 \text{ Hz}$ ，入户电压为 220 V 。

（2）单相负载：采用一根相线（L）（俗称火线）和一根中性线（N）（俗称零线）一起给用电设备提供电源，使其做功，就称为单相负载。如：电灯、电视机、洗衣机、电饭煲、空调、冰箱、电脑等。

（3）三相负载：采用三根相线（A、B、C 三相）或三根相线和一根中性线给用电设备提供电源，使其做功，就称为三相负载。当三相的阻抗相等时，称为对称三相负载。如三相交流电机、大功率三相空调器等为三相对称负载。但在许多情况下，三相的阻抗是不相等的，如居民用电是多种不同的电器组合而成，不同时间内各相的负载是不同的，这时称为非对称三相负载。

（4）星形联结：三相电源的星形接法是把三相电源三个绕组的末端 X、Y、Z 连接在一起，成为一中性点 N，引出一条导线称为中性线，从始端 A、B、C 引出三条导线称为端线，这种接法称为三相电源的星形接法，简称星形或 Y 形电源。

（5）三相负载的星形接法：将 A'、B'、C' 三相的负载通过导线分别与电源的三根相线 A、B、C 相接，三相负载的另一端通过导线连接到一起为负载的中性点 N'。如果将负载的中性点 N' 用导线与电源的中性点 N 相连，就与电源构成 Y-Y 联结。如图 1-6-1 所示。

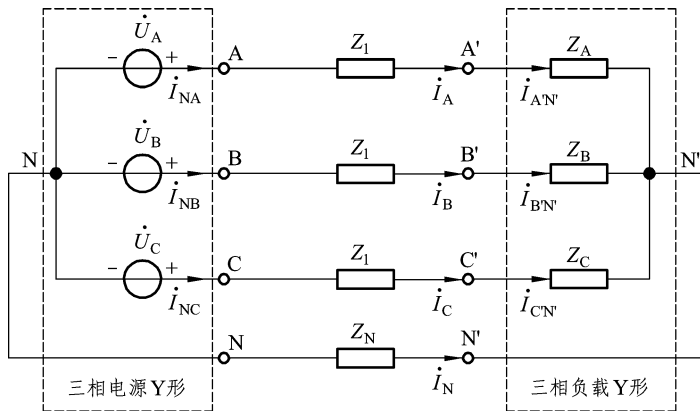


图 1-6-1 三相电源 Y 形 - 三相负载 Y 形连接（Y₀ 形）

（6）三角形联结：将三相电源（负载）依次连接成一个回路，再从端子 A、B、C（A'、B'、C'）引出端线，就成为三相电源（负载）的三角形联结。如图 1-6-2 所示。

有中性线的 Y-Y 联结称为三相四线制接法，即 Y₀ 接法。无中性线的 Y-Y 联结称为三相三线制接法，即 Y 接法。

如果电源为 Y 形，负载为 Δ 形，二者连接后构成 Y- Δ 形联结。还有 Δ - Δ 联结、 Δ -Y 联结，均属三相三线制。

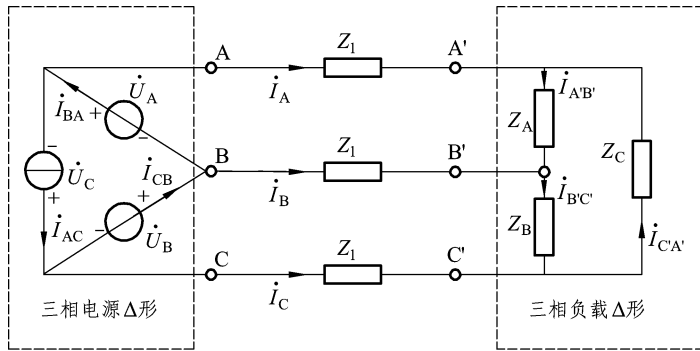


图 1-6-2 三相电源 Δ 形 - 三相负载 Δ 形联结

(7) 线电流与相电流：如图 1-6-1、图 1-6-2 所示，流经传输线中的电流 (i_A 、 i_B 、 i_C) 称为线电流，流经中性线中的电流 (i_N) 称为中性线电流。三相电源和三相负载中每一相 (每个支路) 的电流 (i_{NA} 、 i_{NB} 、 i_{NC} 、 $i_{A'N}$ 、 $i_{B'N}$ 、 $i_{C'N}$ 、 i_{BA} 、 i_{CB} 、 i_{AC} 、 $i_{A'B'}$ 、 $i_{B'C'}$ 、 $i_{C'A'}$) 称为相电流。可以看出，对于 Y 形联结，线电流等于相电流；对于 Δ 联结线，线电流不等于相电流。

(8) 线电压与相电压：各传输线线端之间的电压称为线电压，如图 1-6-1、图 1-6-2 中所示电源端的 \dot{U}_{AB} 、 \dot{U}_{BC} 、 \dot{U}_{CA} 和负载端的 $\dot{U}_{A'B'}$ 、 $\dot{U}_{B'C'}$ 、 $\dot{U}_{C'A'}$ 。三相电源和三相负载中每一相的电压称为相电压，如图 1-6-1 中的三相负载各相的电压 $\dot{U}_{A'N}$ 、 $\dot{U}_{B'N}$ 、 $\dot{U}_{C'N}$ 。由图 1-6-1 和图 1-6-2 可以看出，对于 Y 形联结，线电压不等于相电压；对于 Δ 形联结，线电压等于相电压。

(9) 同名端：对互感电路 (如变压器)，有两组线圈。规定施感电流流进一线圈的端子和在另一个线圈中的互感电压的正极性端子称为两耦合线圈的同名端，用星号或小黑点将它们标记出来。

(10) 理想变压器：是一个端口的电压与另一个端口的电压成正比，且没有功率损耗的一种互易无源二端口网络。它是根据铁芯变压器的电气特性抽象出来的一种理想电路元件。

设变压器一次侧绕组与二次侧绕组的匝数比为 $n = \frac{N_1}{N_2}$ ，则 $n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ 。当理想变压器二次侧接一个电阻 R 时，反映到一次侧的等效输入电阻为 $n^2 R$ 。

2. 三相对称负载作星形联结时，线电压 (流) 与相电压 (流) 的关系

- (1) 线电流等于相电流，即 $I_L = I_p$ 。各相电流相等，相差 120° ；中性线的电流为零。
- (2) 线电压等于 $\sqrt{3}$ 倍相电压，即 $U_L = \sqrt{3}U_p$ ，如果相电压为 220 V，则线电压为 380 V。

3. 三相对称负载作三角形联结时，线电压 (流) 与相电压 (流) 的关系

- (1) 线电流等于 $\sqrt{3}$ 倍相电流，即 $I_L = \sqrt{3}I_p$ 。
- (2) 线电压等于相电压，即 $U_L = U_p$ 。

4. 三相不对称负载作星形联结时，线电压 (流) 与相电压 (流) 的关系

- (1) 采用三相四线制接法即 Y_0 接法时。由于电源的对称性，连接中性线后，保证了每相

的电压维持对称不变，仍有 $I_L = I_p$ ， $U_L = \sqrt{3}U_p$ 。这时各相电流不相等，中性线的电流也不会为零，因此，不对称负载时，中性线必须保证牢固连接，保证与端线相同的线径。

(2) 采用三相三线制接法即 Y 接法时，也就是中性线断开时，会导致三相负载电压的不对称，负载中性点的电位不再为零，偏离原来的位置，致使负载轻的那一相的相电压升高，使负载遭受过压而损坏，负载重的一相相电压又过低，使负载不能正常工作。因此，对于不对称负载，必须采用 Y_0 接法，即有中性线的接法。

5. 三相不对称负载作三角形联结时，线电压（流）与相电压（流）的关系

(1) 电源的线电压对称时，加在三相负载上的电压仍是对称的，对各相负载的工作没有影响， $U_L = U_p$ 不变。

(2) 由于各相的负载不同，所以各相的电流也不同，即 $I_L \neq \sqrt{3}I_p$ ，且各线电流不相等。

6. 单相变压器特性

(1) 用双踪示波器判别变压器绕组的同名端。如图 1-6-3 所示，先将变压器的一次侧与二次侧的一端连接到一起接地，一次侧加上 36 V 的交流信号，用双踪示波器的 Y_A 与 Y_B 分别接变压器的一次侧与二次侧，观察信号。如果二者同相，则连接点为同名端。

(2) 空载特性。变压器一次侧开路，一次侧电压与电流的关系称为变压器的空载特性。

(3) 令负载依次增加一个 220 V/25 W 的灯泡，记录原边与副边的电压与电流。

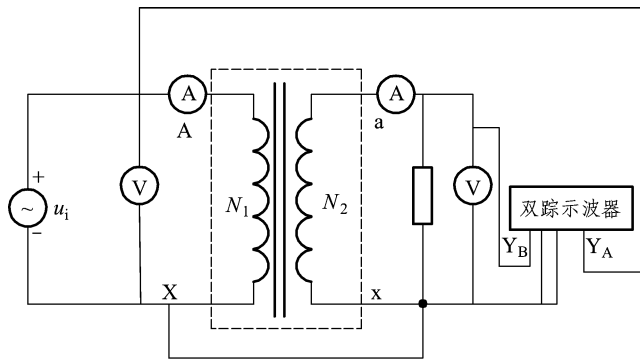


图 1-6-3 单相变压器实验图

四、实验设备（见表 1-6-1）

表 1-6-1 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	电工电路技术实验装	DGJ-01	1	实验平台
2	交流电压表	0~500 V	1	仪表区
3	交流电流表	0~5 A	1	仪表区
4	数字万用表	VC890D	1	备用

5	三相自耦调压器	三相调压输出	1	
6	三相灯组负载	220 V, 25 W 白炽灯	9	
7	电流插头线	专用	1	
8	变压器	36 V、220 V	1	屏内
9	电阻器	51 Ω /8 W, 510 Ω /2 W	各 1	DGJ-05 元件箱

五、实验内容与基本步骤

1. Y-Y 联结，带中性线 (Y_0) 与不带中性线 (Y) 时，测量各电压与电流

实验线路如图 1-6-4 所示，三相对称电源由实验台上的自耦变压器调节输出。三相负载为灯组，每组有三个 220 V/25 W 的白炽灯。接好线路后，将三相调压器的旋柄置于输出为 0 V 的位置。经指导老师检查后，方可开启实验台电源。

(1) 调节调压器的输出，使输出的三相线电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 为 110 V。分别测量三相负载的线电压、相电压、线电流、相电流、中线电流，填入实验报告中表 1-6-1 中。

(2) 关闭电源，按实验报告中的表 1-6-1 的实验内容改变负载与中性线的连接，使三相负载不平衡、与电源构成 Y_0 联结与 Y 联结，测量并记录相关电压与电流。

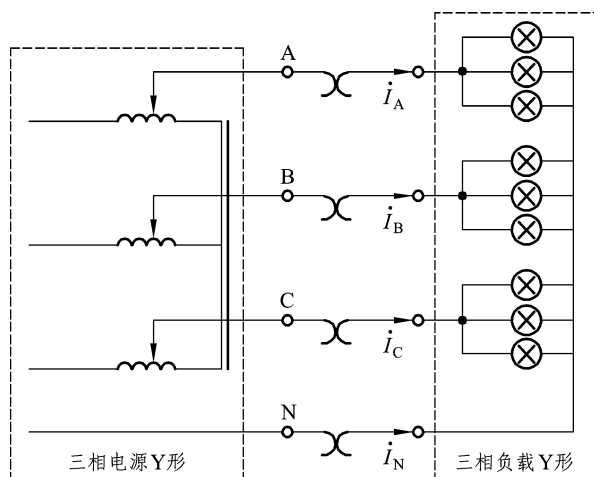


图 1-6-4 三相电源 Y 形 - 三相负载 Y 形联结 (Y_0 形)

2. Y- Δ 联结，带中性线 (Y_0) 与不带中性线 (Y) 时，测量各电压与电流

(1) 按图 1-6-5 改接线路，调节调压器从零开始增大，使输出线电压为 110 V。

(2) 按实验报告中表 1-6-2 的内容测量并记录相关电压与电流值。

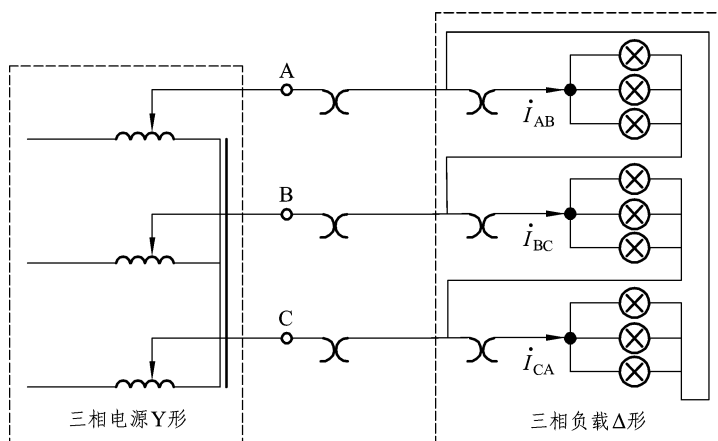


图 1-6-5 三相电源 Y 形 - 三相负载 Δ 形联结

3. 单相变压器基本特性测试

(1) 用双踪示波器判别变压器绕组的同名端：如图 1-6-3 所示，先将变压器的一次侧与二次侧的一端连接到一起接地，一次侧加上 36 V 的交流信号，用双踪示波器的 Y_A 与 Y_B 分别接变压器的一次侧与二次侧，观察信号。如二者同相，则连接点为同名端。

(2) 测空载特性：变压器二次侧开路，测量一次侧的电流、电压及二次侧的电压值，记录数据到实验报告中的表 1-6-3 的第一行中。

(3) 测外特性曲线：令负载依次增加一个 220 V/25 W 的灯泡（最多 5 个），记录一次侧与二次侧的电压与电流到实验报告中的表 1-6-3 中。

六、实验注意事项

(1) 通电前一定要认真检查，操作时要单手操作，更换灯泡或换线时一定要先断电。

(2) 每次实验完毕，均需将三相调压器调回零。

(3) 在没有中性线时的非对称负载实验中，要将三相电源的电压调低，确保负载中的最高相电压不超过 240 V，否则实验台会声光报警并跳闸。

实验七 三相鼠笼式异步电动机运行控制

一、实验基本任务

- (1) 用交流接触器与按钮实现三相电机的点动与自锁控制；
- (2) 三相鼠笼式异步电动机联锁正/反转控制；
- (3) 三相鼠笼式异步电动机接触器与按钮双重联锁正/反转控制。

完成任务：(1) 的满分为 70 分，(1) + (2) 的满分为 90 分，(1) + (2) + (3) 满分为 100 分。

二、实验目的与要求

- (1) 掌握三相电机的点动与自锁原理；
- (2) 了解三相电机的正/反转控制方法；
- (3) 了解三相电机的按钮双重联锁控制电路。

三、实验原理

1. 三相鼠笼式异步电动机的结构与铭牌

异步电动机是基于电磁原理把交流电能转换为机械能的一种旋转电机。

1) 三相鼠笼式异步电动机的基本结构

三相鼠笼式异步电动机的基本结构有定子和转子两部分。定子主要由定子铁芯、三相对称定子绕组和机座等组成，是电动机的静止部分。三相定子绕组一般有 6 根引出线，出线端装在机座外面的接线盒内，如图 1-7-1 所示，根据三相电源电压的不同，三相定子绕组可以接成星形 (Y) 或三角形 (Δ)，然后与三相交流电源相连。转子主要由转子铁芯、转轴、鼠笼式转子绕组、风扇等组成，是电动机的旋转部分。小容量鼠笼式异步电动机的转子绕组大都采用铝浇铸而成，冷却方式一般都采用扇冷式。

2) 三相鼠笼式异步电动机的铭牌

三相鼠笼式异步电动机的额定值标记在电动机的铭牌上，本实验中所用的三相鼠笼式异步电动机铭牌如表 1-7-1 所示。

表 1-7-1 三相鼠笼式异步电动机铭牌

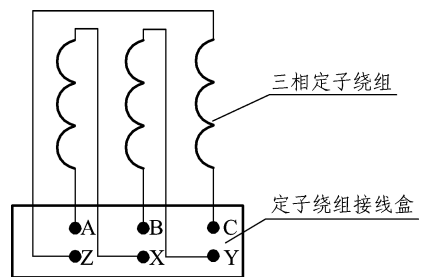


图 1-7-1 三相电机原理示意图

型 号	DJ24	电 压	380 V/220 V	接 法	Y/ Δ
功 率	180 W	电 流	1.13 A/0.65 A	转 速	1 400 r/min
定 额	连 续				

2. 交流接触器

继电器-接触控制在各类生产机械中获得广泛地应用，凡是需要进行前后、上下、左右、进退等运动的生产机械，均采用传统的典型的正/反转继电器-接触控制。

交流电动机继电器-接触控制电路的主要设备是交流接触器，其主要构造如图 1-7-2 所示。主要包括四个部分。

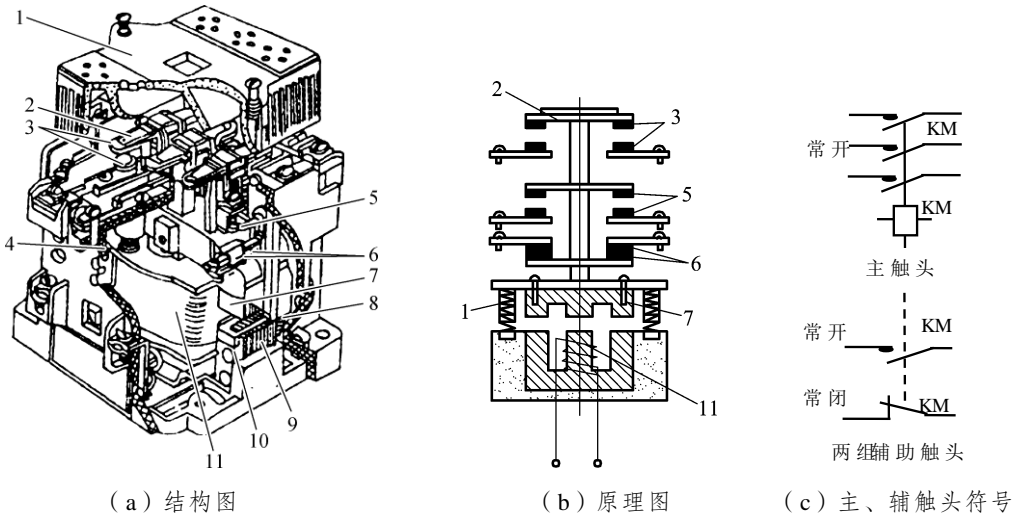


图 1-7-2 交流接触器

1—灭弧罩；2—触点压力弹簧片；3—主触点；4—反作用力弹簧；5—辅助动合触点；6—辅助动断触点；7—动铁芯；8—缓冲弹簧；9—静铁芯；10—短路环；11—线圈

(1) 电磁系统：包括铁芯、吸引线圈和短路环。

(2) 触头系统：包括主触头和辅助触头。也还可以按吸引线圈得电前后触头的动作状态，分为动合（常开）触头、动断（常闭）触头两类。

(3) 消弧系统：在切断大电流的触头上装有灭弧罩，以迅速切断电弧。

(4) 接线端子，反作用弹簧等。

在控制回路中常采用接触器的辅助触头来实现自锁和互锁控制。要求接触器线圈得电后能自动保持动作后的状态，这就是自锁，通常用接触器自身的动合触头与启动按钮相并联来实现，以达到电动机的长期运行，这一动合触头称为“自锁触头”。使两个电器不能同时得电动作的控制，称为互锁控制，如为了避免正、反转两个接触器同时得电而造成三相电源短路事故，必须增设互锁控制环节。为了操作的方便，也为了防止因接触器主触头长期通过大电流而烧蚀并导致触头粘连后造成三相电源短路，通常在具有正、反转控制的线路中，采用既有接触器的动断辅助触头的电气互锁，又有复合按钮机械互锁的双重互锁的控制环节。

在电气控制线路中，最常见的故障发生在接触器上。接触器线圈的电压等级通常有 220 V 和 380 V 等，使用时必须认清，切勿疏忽。否则，电压过高易烧坏线圈；电压过低，会使线圈吸力不够而使触头不易吸合或吸合频繁，这不但会产生很大的噪声，也会因磁路气隙增大，致使电流过大，从而烧坏线圈。此外，在接触器铁芯的部分端面嵌装有短路铜环，其作用是为了使铁芯吸合牢靠，消除颤动与噪声。若发生短路环脱落或断裂，接触器将会产生很大的振动与噪声。

3. 控制按钮

控制按钮是专供人工操作使用的，通常用于短时通、断小电流的控制回路，以实现近、远距离控制电动机等执行部件的启、停或正/反转。对于复合按钮，其触点的动作规律是：当按下时，其动断触头先断，动合触头后合；当松手时，则动合触头先断，动断触头后合。控制按钮的示意图与符号如图 1-7-3 所示。

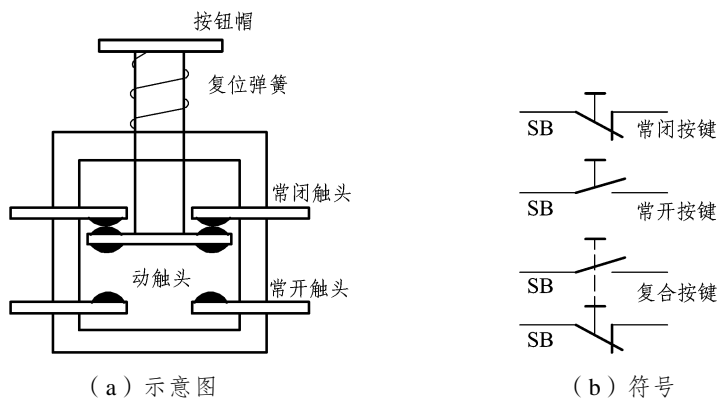


图 1-7-3 控制按钮的示意图与符号

4. 热继电器

采用热继电器可实现过载保护，使电动机免受长期过载之危害。其主要的技术指标是整定电流值，电流超过此值的 20% 时，其动断触头应能在一定时间内断开，切断控制回路，动作后只能由人工进行复位。

四、实验设备（见表 1-7-2）

表 1-7-2 实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220 V	1	
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	交流接触器		2	
4	按钮		2	
5	热继电器		1	

五、实验内容与基本步骤

1. 点动控制

实验线路如图 1-7-4 所示，其中 M 表示三相电机，FR 为热继电器，SB₁ 为常开按钮。电机接成△形，实验线路电源端接三相自耦调压器输出端 U、V、W，供电电压调为 220 V。

(1) 连接主回路，从 220 V 三相交流电源的输出端 U、V、W 开始，经接触器 KM 的主触头，热继电器 FR 的热元件到电动机 M 的三个线端 A、B、C，用导线按顺序串联起来（电机上 A 与 Z、B 与 X、C 与 Y 相接，连成△形接法）。检查主电路连接完整无误。

(2) 连接控制电路。从 220 V 三相交流电源某输出端（如 V）开始，经过常开按钮 SB₁、接触器 KM 的线圈、热继电器 FR 的常闭触头到三相交流电源另一输出端（如 W）。显然这是对接器 KM 线圈供电的电路。

(3) 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器输出，使输出线电压为 220 V。按启动按钮 SB₁，对电动机 M 进行点动操作，比较按下 SB₁ 与松开 SB₁ 时电动机和接触器的运行情况。实验完毕，按控制屏停止按钮，切断实验线路三相交流电源，并将调压器调到零。

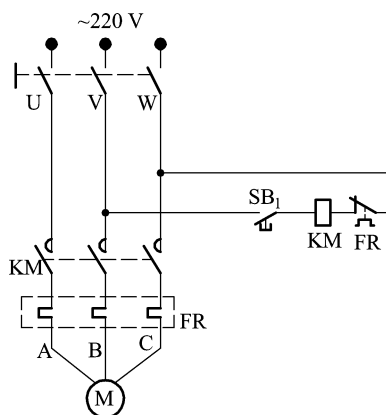


图 1-7-4 带热继电器的点动控制实验原理图

2. 自锁控制电路

按图 1-7-5 所示连接线路，它与图 1-7-4 的不同点在于控制电路中多串联了一只常闭按钮 SB₂（停止按钮），同时在 SB₁（启动按钮）上并联了接触器 KM 的一个常开（动合）触头，它起自锁作用。

(1) 按控制屏启动按钮，接通 220 V 三相交流电源。按启动按钮 SB₁，松手后观察电动机 M 是否继续运转。按停止按钮 SB₂，松手后观察电动机 M 是否停止运转。

(2) 按控制屏停止按钮，切断实验线路三相电源，拆除控制回路中的自锁触头 KM，再接通三相电源，启动电动机，观察电动机及接触器的运转情况，从而验证自锁触头的作用。

(3) 实验完毕，将自耦调压器调回零位，按控制屏停止按钮，切断实验线路的三相交流电源。

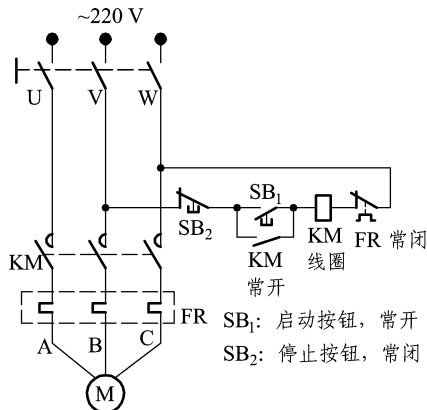


图 1-7-5 带热继电器自锁、启动与停止控制实验原理图

3. 接触器联锁的正、反转控制线路

按图 1-7-6 所示连接线路，经指导教师检查后，方可进行通电操作。

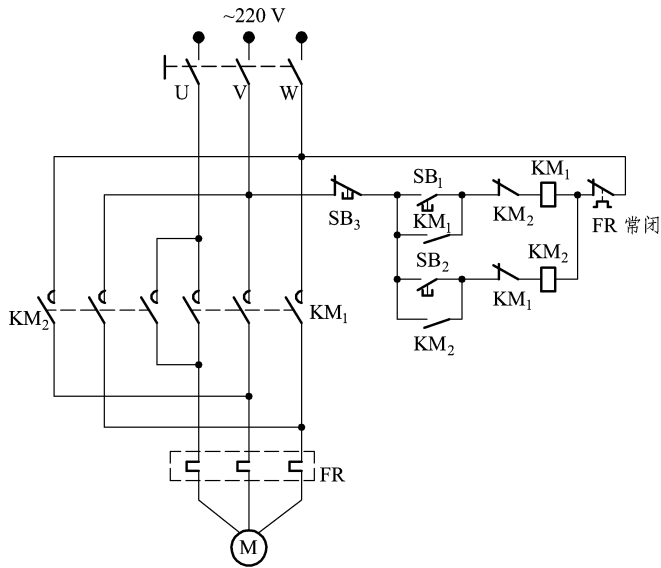


图 1-7-6 接触器联锁的正反转控制线路

- (1) 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器，使输出线电压为 220 V。
- (2) 按正向启动按钮 SB_1 ，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (3) 按反向启动按钮 SB_2 ，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (4) 按停止按钮 SB_3 ，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (5) 再按 SB_2 ，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (6) 实验完毕，按控制屏停止按钮，切断三相交流电源。

4. 接触器与按钮双重联锁的正、反转控制线路

按图 1-7-7 所示连接，经指导教师检查后，方可进行通电操作。

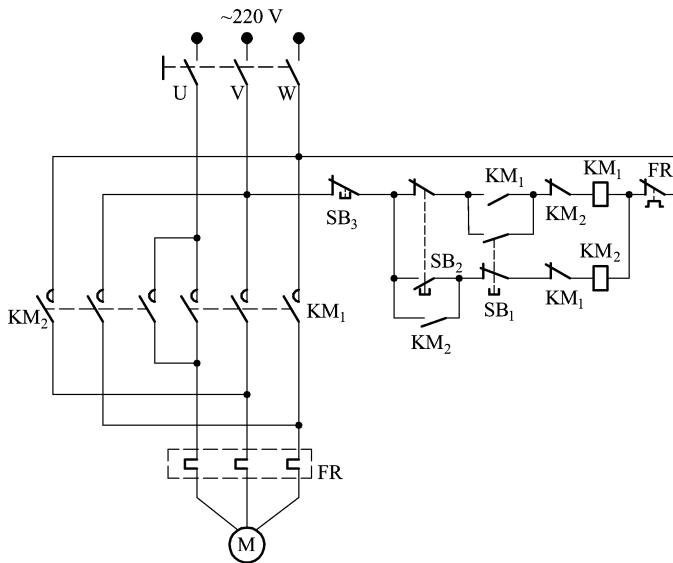


图 1-7-7 接触器联锁的正、反转控制线路

1) 开启控制屏电源总开关, 按启动按钮, 调节调压器, 使输出线电压为 220 V。

(2) 按正向启动按钮 SB_1 , 电动机正向启动, 观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。按停止按钮 SB_3 , 使电动机停止。

(3) 按反向启动按钮 SB_2 , 电动机反向启动, 观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。按停止按钮 SB_3 , 使电动机停止。

(4) 正向(反)运行时, 直接按反向(正向)启动按钮, 观察有何情况发生。

(5) 电动机停稳后, 同时按正、反启动按钮, 观察有何情况发生。

(6) 实验完毕, 按控制屏停止按钮, 切断三相交流电源。

六、实验注意事项

(1) 所有实验的主回路都要采用特定颜色的导线连接, 以方便老师检查。

(2) 连接控制线路时一定要认真仔细, 否则特别容易短路或不通。