
电工与电路基础实验

保延翔 常莉莉 郑子生 编

中山大学公共实验教学中心

2019 年 7 月

目录

第一章	实验规则、技能与安全	3
1.1	实验室规则.....	3
1.2	实验顺序.....	4
1.3	实验中要养成良好的作风和习惯	6
1.4	实验安全事项.....	8
1.5	实验故障及一般排除方法	12
第二章	实验内容	15
实验一	计算机辅助电路仿真技术	15
实验二	实验仪器使用入门.....	23
实验三	元件伏安特性的测量	28
实验四	基尔霍夫定律	34
实验五	戴维南定理和诺顿定理	38
实验六	一阶电路动态过程的研究	46
实验七	二阶电路动态过程的研究	50
实验八	R、L、C 元件阻抗特性的研究	54
实验九	正弦稳态交流电路相量的研究	57
实验十	三相交流电路电压、电流的测量	62
实验十一	R、L、C 串、并联谐振电路	66
*实验十二	RC 选频网络特性测试	72
*实验十三	双口网络测试	75
附表	78
实验三	电阻元件伏安特性测量实验记录表	78
实验四	基尔霍夫定律实验记录表	82
实验五	戴维南定理和诺顿定理实验记录表	85
实验六	一阶动态电路实验记录表	88
实验七	二阶电路动态过程的研究实验记录表	90
实验八	R、L、C 元件阻抗特性测试表	92
实验十一	R、L、C 串、并联谐振实验记录表	93
实验十二	RC 选频网络特性测试表	95
实验十三	双口网络测试表	96

第一章 实验规则、技能与安全

1.1 实验室规则

实验室是教学、实验和科学研究的场所。为培养学生严肃认真、实事求是、理论联系实际科学作风和良好的实验习惯，为确保人身和设备安全，切实做到安全第一，入室人员必须遵守下列规则：

- (1) 实验课必须按时到达，不得迟到或无故离开；因上述原因出现实验事故，责任自负。
- (2) 操作前必须充分做好预习，明确实验目的、内容、方法、步骤和应注意的问题。
- (3) 爱护仪表、仪器、设备、未搞清使用方法之前，不得随意动用。使用时应轻拿轻放，摆放合理，以确保操作安全，便于操作、观察和测量。
- (4) 严禁带电进行拆改接线等操作。接好线后，必须经老师和有关人员检查并允许，才能合闸。
- (5) 实验过程要养成手始终不触及任何带电金属部分而只摸拿绝缘部分的习惯，以防意外触电。也不要随便动用与本次实验无关的仪器、仪表、设备等。
- (6) 实验中要随时注意异常现象的观察。如果发生故障，必须立即断开电源，保留现场，并报告有关人员进行检查处理。
- (7) 要始终保持实验室安静和整洁，不得在室内吸烟、吃零食、扒桌子、串座位、喧哗、打闹或随意走动，未经允许室内物品不得带出。
- (8) 对违反操作规定以及损坏仪器、仪表、设备、工具和元器件者应检查原因。对情节严重者，除对其批评教育，停止实验外，还要按学校有关规定进行赔偿。

(9) 实验结束后，应先断开各仪器电源开关，再断开实验箱上电源开关，把实验所用仪器、仪表、设备、导线、座凳等归位，整理就绪，清扫后经允许才能离开。

1.2 实验顺序

实验程序一般分为实验课前预习、进行实验、编写实验报告三个阶段。

一、实验课前预习阶段

实验能否顺利进行和达到预期效果，取决于认真预习和充分准备，尤其是思想准备。实验是培养科技人才能力、素质的必经之路，一定要认真对待。从第一个实验开始就要严格要求自己，不仅能认真按要求去做，而且从学会测量方法及仪器、仪表、设备的正确使用做起，能真正学会解决实验中的问题，逐渐培养自己学以致用用的能力。因此课前预习一定要做到：

(1) 必须认真阅读实验指导书和复习有关理论，查阅有关数据，明确实验目的、任务，彻底弄清实验原理、具体内容和要解决的问题，需观察什么现象，测量哪些数据，明确采用的方法和正确的操作步骤等。

(2) 尽可能熟悉仪器、仪表、设备的工作原理和技术性能、额定指标和主要特性，以及正确使用的方法和条件，牢记使用当中应注意的问题。

(3) 准备好实验待测数据的记录表格、记录与计算工具，并预先计算出待测量的数值范围。这些数值范围既可作为仪表量程、仪器参数选择的依据，又可作为实验中随时与测量值进行比较和分析的依据。

(4) 实验小组要预先讨论、商量并进行合理分工。每个成员都要牢记实验中应注意和要解决的问题，以及可能出现的现象，自己应负的责任等，做到心中有数，实验中才可能密切配合，达到事半功倍的效果。

二、进行实验阶段

实验是对每位同学综合能力的培养和考验。聪明人能利用每一个可能利用的条件来充实、锻炼、提高自己，而糊涂人则把来之不易的条件白白扔掉。聪明人宁可重做三遍，也不去抄取别人的数据和结论，而糊涂人以轻取别人的数据和结论为“便宜”，浪费自己的时间，走过场，聪明人每次都踏踏实实的去做、去测，收获永远是自己的，糊涂人毫不吝惜地扔掉了不该扔掉的，造成自己的损失。

希望每位同学从第一个实验开始就养成只要干一件事，就尽量把它彻底干好，不仅会测了、会用了、会算了，更要知道为什么要这样测、这么用、这么算。多问几个为什么（问自己、问老师、问书本），遇到问题多想一些办法，多出一些主意，处处体现出分析问题和解决问题的水平和能力，使每次实验都确有收获。

实验阶段具体步骤：

（1）实验操作前要认真听老师讲具体要求，即实验中要看的，用的、测的、算的，要干的都是什么？又怎样去看、去用、去测、去算？实际操作步骤、方法、条件是什么？理论根据又是什么？怎样解决实验中的问题？怎样能保证安全？注意事项是什么？这些都清楚了，再进行具体操作。对于没听清听懂的事项要及时发问，千万不要不懂就操作，造成不应该发生的意外和损失。

（2）实验操作和测量过程中应做到以下几点：

1）做好测量前的各种准备工作。首先一一核对实验台上的仪器、仪表和设备，核对实验单元等的名称、规格、型号，以及检查它们的外表有否损坏。然后按正确使用要求，合理摆放整齐，使之既便于操作又便于观察、测量和读数，而又不相互影响。选择各表量程，调好机械零位。各种电源保证从 0 起调。各仪器旋钮放在合适的起始位置后，再接通示波器、电子管毫伏表等有源器件的工作电源，进行预热。

2）按实验内容要求进行电路参数选择、核对和电路的正确连接，接好线后要先经自查无误，再请教师复查，经同意后才能接通电源。

3）接通电路电源的同时一定要注意观察各表计和设备等的指示规律是否正常，有无反转、过量程，有否冒烟、发热，有无产生焦味、异常声响。如有异常立刻断电检查，待异常排除后再重新合电源。

4）测量读数时要看准各表计指针所指格数，表计满量程时的示值到底是多少，表显示值的数量和单位一定要搞清楚、记清，并按要求逐项进行测量和记录，尤其是关键数，特殊点、拐点的数值一定要测准记清。

（3）实验课收尾工作。完成全部规定的实验项目后，首先断开各带电部分电源，再认真检查实验记录的项目、数量、单位是否正确，与预算值是否相符，有无漏洞，需画曲线的点是否选择合理，关键点、拐点是否测准，是否都符合规律。经自查计算、分析认为正确无误，再请老师复查和在原始记录上签字通过后，先关掉各工作电源和实验台上的总电源、方可进行拆线，记录各实验仪器、仪表、设备的名称型号、量程、编号，把桌面和

座位等整理归位，经老师验收后方可离开。对于没有客观原因的错误测量和数据记录，应该重测。

三、编写实验报告阶段

实验报告是实验工作的全面总结，是分析和提高的重要阶段。用确切简明的形式，将实验结果完整、真实地表达出来，对实验工作总结、经验交流、科研成果推广、学术评议起着至关重要的作用。科技工作者、教师、工程技术人员、大专学生能否写好实验报告，也是体现其基本功和科研能力的一个重要方面，为此要注意下列要点：

(1) 实验报告的编写。要求文理通顺、简明扼要、字迹端正、图表清晰、分析合理（包括数据整理、结果分析、误差估计等）、结论正确。书写格式要规范化，需使用统一的实验报告用纸。编写实验报告时，对于统一要求以外的部分，应按每个实验的“实验报告要求”进行补充。

(2) 实验报告中的曲线。图要画在预定位置或坐标纸上，选取比例要适当，坐标轴要注明单位，绘图时关键点、拐点和特征点一定要绘出，还要尽量使绘出的曲线光滑均匀。

(3) 实验中的故障记录。实验中如果发生故障，应在报告中写明故障现象，分析产生故障的原因，以及排除故障采取的措施和方法等。

(4) 实验报告格式。参见本书的“实验报告”。

1.3 实验中要养成良好的作风和习惯

作风和习惯的好坏是事情成功与否的前提和关键，进行试验也是如此。所以要想真正做好试验并确有提高和收获，必须养成以下的良好作风和习惯：

(1) 拉合电源要与合作者打招呼。养成对个人和他人安全绝对负责的习惯。试验时要养成手不乱摸乱碰和始终只摸拿绝缘部分的习惯。

(2) 连接线路要做到心中有图。要养成背图接线的习惯，电路图记不清，背不下来，先不进行连接。根除未看懂、对不上号就盲目胡乱接线的不良作风和习惯。

(3) 接线后要及时清理现场。养成接线后随时拿开多余导线、导体，及时清理现场和认真进行自查、互查，不放过任何可疑点的作风和习惯。

(4) 做到事事心中有数。养成认真预习、预算及测量每个数据，每进行一步都做到心中有数的好习惯。克服对其结果不知是否正确合理，是否符合规律，盲目从事操作与测量的不良习惯。

(5) 每次用表前都要仔细查看。每次使用仪器、仪表前都要仔细看看是否拿错、用错，检查仪表起始位置、量程范围是否选择正确合理，测量接线是否连接准确无误。克服不管不顾，拿起来就用就测的不良习惯。

(6) 要进行预通电。预通电是指在各项检查无误后，先试通电（如果电源电压可调，应从 0V 或低电压开始逐渐加到测试电压）。通电瞬间，一定要聚精会神，眼观六路，耳听八方，听、看、闻全方位观察和判断各种现象正常与否，各表计指示是否符合规律。养成经检查全部现象正常无误后，再按要求逐项进行测试的习惯。

(7) 认真读取和记录数据。实验中数据记录很关键，要养成数量级、量纲、单位、条件一起记，边记边核算并与预算值进行比较，弄清是否符合规律、是否合理的根据和理由。克服总想看别人的数据，总想问老师对不对，而自己心中无数的毛病。养成宁可重做三遍，也决不轻取别人数据的好习惯。

(8) 要真正投入、善始善终。无论做什么实验，都要养成有头有尾，亲自动手做好每个实验内容的作风和习惯。克服自己糊弄自己，把自己当成局外人，既讲不清道理，又不上心，什么都干不好，也不想干的懒人习气。克服凑数、跟着看、抄结果的不良作风和习惯。

(9) 事故的判断处理。养成遇到事故、异常现象时头脑冷静、判断准确、处理果断的习惯。不仅能迅速断电保护现场，积极主动进行回忆、分析、查找原因，提出排除故障方法，还能吸取教训，增强自信。

(10) 注意能力、素质的提高。整个试验过程都要有意识的注重自身科研素质和能力的提高，培养自己既思路敏捷，又动作娴熟准确；既有充实的理论基础，又有分析问题和解决实际问题的能力。养成既能讲清道理，又能出高招，想出更好、更科学方法的习惯。

(11) 做好实验后的就序工作。实验结束要养成及时清理归位、并对实验中所发生的事情有个交待的习惯。发现了什么问题，是如何解决的，或者提出合理建议、办法，尽量做到给下一拨同学留下提示或宝贵意见，为他们创造更方便有利的条件。克服出了问题不明说，弄坏了东西不吭声，有意无意给下一拨同学添麻烦出难题或根本不负责的坏习惯。

1.4 实验安全事项

安全第一，对电力生产、科学研究、教学实验，同样都是至关重要的，如何确保人身和设备安全，不触电，不损坏仪器、仪表、设备，是实验中要首先考虑和解决的。

一、 如何防止触电，确保人身安全

人体也是导体，当人体不慎触及电源或带电体时，电流就会流过人体，使人受到电击伤害。伤害程度取决于通过人体电流的大小，通电时间的长短，电流通过人体的途径，电流的频率以及触电者的身体状况等。36V 以上直流和交流电对人体就有危险，220V 工频交流电对人体更危险。1mA 的电流流过人体时就有不愉快的感觉，50mA 的电流流过人体就可能发生痉挛、心脏麻痹，如果时间过长就有生命危险。我们在实验中（日常生活中也是如此）经常要与 220V / 380V 打交道，如果忽视安全用电或粗心大意，就很容易触电。例如：由于疏忽，未将电源闸刀拉开就接线或拆线；又如实验中，某同学正在接线，而另一同学不打招呼就去接通电源，或者操作过程中手触摸了一头已连在电源或电路端子上，而另一头空甩的线头上；或者触摸了外壳带电的仪器上等。尽管实验室采取了有关防止触电的措施，但仍需每位同学从思想上重视。为防止万一，确保自身和他人的安全；实验中还要做到以下几点：

（1）实验中应严格遵守操作规则。

（2）不能随意接通电源，尤其是室内总电源，未经允许绝对不能擅自接通。实验台上电源的通断也要与本组同学打招呼，如果有同学正在接、改线时，千万不能不管不顾就去接通电源。

（3）遵守接线基本规则，先把设备，仪表、电路之间的线接好，经查（自查、互查）无误后，再连接电源线，经老师检查同意后再接通电源（合闸）。拆线顺序是断开电源后先拆电源线，再拆其它线。

（4）不能随意甩线，绝对不能把一头已经接在电源上的导线的另一头空甩着。电路其它部分也不能有空甩线头的现象。线路连接好后，多余、暂时不用的导线都要拿开，放在抽屉里或合适的地方。

（5）实验中手和身体绝对不摸不碰任何金属部分（包括仪器外壳）。养成实验时手始终只接触绝缘部分的好习惯，同时要绝对克服手习惯性的摸这摸那的坏习惯，或把整个

手都放在测试点上的不良测试方法。

(6) 谨防电容器件放电放炮而使人体触电。电容器件通电时，人与器件最好保持一定距离，尤其对容量较大的电容，防止因电容极性接反，或介质耐压等级不够被击穿，放炮蹦人事故的发生。也不要随便去摸没有与电源接通和空放着的高电压大电容器的两端，防止带电电容通过人体放电。

(7) 防止电灼伤烫伤。测量时也要防止各种原因造成的短路所产生的电弧灼伤，被大功率管散热片、电阻性元件发热烫伤或被接在电源上的变压器、耦合电感元件等副边端子上的感应电压击伤等事故的发生。

(8) 万一遇到触电事故时不要慌乱，首先应迅速断开电源。断电不方便处可用绝缘器具操作。使触电者尽快脱离电源后再进行救护。如果同学在实验中趴在桌上，或者是物品、仪表、仪器摆放不合理挡住了电源开关，万一发生触电或事故，别人就无法及时拉闸断电，因而延误了时间而使事故扩大，造成生命和财产不必要的损失和破坏。这些在实验当中都要多加注意。

二、如何确保设备安全

(一) 一般注意事项

(1) 挪用和搬运各种仪器、设备时，必须轻拿平放，或按要求位置正确放置。不能磕碰或任意扳扭各仪器、仪表上的开关、旋钮、按键等。

(2) 对不了解和掌握其性能、特点和使用方法的仪器、设备等，不得使用 and 进行通电，更不能存在试一试坏不了的侥幸心理，把东西试坏了。

(3) 各种表计通电测量过程中，当测试表笔未离开测试点时不能随意进行量程切换，更不能把万用表等的量程转换开关转来转去，这样极易使仪表损坏。

(二) 设备安全的关键是正确选择与正确使用

(1) 正确选择仪器、设备的几个方面：

1) 根据用途选择类别，如电源类，仪器、仪表等，负载元器件类等。

①电源类。主要选择输出信号类别，直流还是交流、正弦波工频源还是信号源，输出方可调不可调，调节方式，稳压源还是稳流源以及最大输出功率、输出电压、输出电流、

最佳阻抗匹配等。

②仪器、仪表等。主要是选择测量类别、测量范围（量程）、测量准确度（级别）、使用位置、使用条件、适用频率范围等。选择表的内阻抗应考虑尽量减少表计接入电路时，对原电路工作状态的影响。所以电压表类选择内阻越大越好，电流表类选择内阻越小越好。

③电阻器件。首先根据需选择电阻器件的类型，电阻的额定功率（瓦数）、阻值、准确度（误差百分数）和电阻的极限工作电压；对于最高环境温度、稳定度、噪声电动势、高频特性等在有些应用场合也需要考虑。在使用时，电阻两端能承受多大电压需根据 $U = \sqrt{PR}$ 计算得出，式中 P 为电阻器件的标称功率， R 为阻值。如已知的条件是电阻两端电压和通过电阻的电流，这时要经过计算才能进行电阻阻值与额定功率（瓦数）的选择，电阻的阻值 $R = U/I$ ，而电阻瓦数由 $P = UI = U^2 / I^2 R$ 求出。选用电阻的标称功率（瓦数）时，要尽量比计算值大些，这样更安全。

④电容器件。除需选择类别、标称耐压值（直流 DC 或交流 AC）、标称容量值以及误差百分数外，还要考虑电容的极性、绝缘材料与阻值、损耗、温度系数、固有电感和工作频率等。电解电容只能用在直流电路，但要注意“+”、“-”极性不能接错。交流电路只能用无极性电容，所以只能选择标 AC 电压标称值的电容，或选择没标“+、-”极性的大于 1.4~2.8 倍直流电压标称值的电容。电容容量根据需要的容抗大小按 $C = 1/\omega X_C$ 进行计算后选择，或通过查有关数据获得。

⑤电感器件。选择时主要考虑电感线圈导线允许电流和电感量大小，而电感值 L 的大小要根据感抗值 $L = X_L / \omega$ 计算得到，或者已知 L 值，再根据使用的电源频率计算 X_L 值。

2) 选择时要综合考虑其配套性。对于连接在同一电路中需同时使用的电源、设备、仪器、仪表、负载元件、电路元器件、连接线、插接件、开关等，使用前要认真核算各自额定值、允许值、量程等是否配套，有关量值应大于实验需要值或选择量。如果额定值彼此有差别或差别大，又没有重新选择的条件时，要就低不就高。也就是说，就允许值、额定值低的，如量程低的、电压低的、或功率低的等待。然后再统一考虑取值和测试点的选择。不能只看其中的一个仪表和元件没超过量程，而不顾另一个已超过了额定值的仪表和元件，不然会造成额定值低的因过载而烧坏，量程低的因过量程把表针打坏等待。

（2）仪器的正确操作与使用：

1) 要认真阅读使用说明书。说明书、表盘符号、铭牌都是仪器仪表设备正确使用的依据，对于没使用过的仪器、仪表、设备一定要先看说明书、铭牌、表盘符号或指定的相

关附录，并且一定要严格按照要求进行操作和使用。

2) 起始位置要正确放置。测量前各仪器、仪表的起始位置，量程选择开关的旋钮位置，各端子、各旋钮大小量程变换装置的位置，一定要放置正确。一般情况，凡是可调的输出类仪器设备、电源等，开始要放在 0 位置，或低输出位置；凡是用来接受信号或测量用的仪器、表针应先放在比估算值偏大的位置、偏大的量程，或合适位置，以防万一。

3) 正确使用调零装置。各表计使用前要调零，所以要弄清各类指针式仪表的机械调零，欧姆表的欧姆调零，检流计和电子仪器仪表的电气调零的区别和正确的调整方法。测量前都要先调零，然后才能进行测量。

4) 正确进行连接。测量时电压表并联，电流表串联，功率表电压端子并联、电流端子串联还要同名端相连等不能接错。各仪器输入、输出端，调压器输入、输出端以及输出起始位置，元器件输入、输出端，变压器输入、输出端等都是绝对不能接错的。测量时接线方式、测试表笔测试位置，应串联的串联，应并联的并联。直流测量还要考虑表的“+”、“-”极性与电源对应关系不能连错。

5) 有源仪器仪表使用的注意事项。使用本身带电源的仪器、仪表进行测量时，还要考虑测量过程中仪器、仪表输出的电流或电压能否损坏被测元件，所以要明了输出电流或电压的数量级。如用万用表的欧姆档测微安表内阻就很危险，由于万用表的欧姆档两个测试端测量时有电流输出，不同倍率输出电流虽然不同，但都可能大于微安表的量程，这就很可能因为测微安表内阻时考虑不周，反而把表烧坏了。测量晶体管等也存在此类问题。用摇表测绝缘电阻时也可能因测试端输出电压过大把被测物绝缘击穿损坏，所以用摇表测绝缘时同样要选择摇表输出电压等级。

6) 正确使用保护措施：

①保险的正确更换。凡是装有保险管（器、丝）的仪表、仪器设备、实验单元、实验中如果烧断保险。不经允许不能随便更换。更换时一定要注意与原保险容量一样大，不能任意换用额定电流值大的保险，如果保险额定电流值超过仪器、仪表最大电流允许值也就起不到保险（保护）作用了。

②用好保护设施。如检流计，磁通计，单、双电桥的检流计，用毕都要短路（短接）锁紧；多量程电表和万用表用毕应将量程放在交直流电压最大量程处；凡是带有工作电源的仪器、仪表使用后都要把电源断开；调压器等用后及时退回 0 输出位置等。

7) 接通电源的同时要注意观察有无异常现象。接通电源时一定要注意观察各表指示

值是否正常，与事先估算值是否接近，有否过量程、反转，有否冒烟、异味、声响、放炮、发热、烧保险等现象出现。如果有异常现象，必须立刻断开电源进行检查，排除故障后，再继续操作。

8) 实验过程中也要注意观察。实验中切记不能只埋头于操作和读数，还应随时注意观察有否上述异常现象出现，尤其是电阻类，时间长了可能出现过热或烧毁。

总之，正确选择和使用设备是一个综合性的问题，也是确保仪表、设备安全的关键。要彻底掌握虽不是件容易的事。但一定要认真去做。保证人身和设备安全的关键是思想上重视和措施得当，安全来自警惕，事故出自麻痹。只要实验中随时注意，并科学对待出现的问题就可确保人身和设备安全。

1.5 实验故障及一般排除方法

故障是实验中常见的事，能否快速、准确查出故障原因、故障点，并及时加以排除，是基本功和能力的体现。要快速准确排除故障，需要有较深的理论基础，又需要有丰富的实践经验和熟练的操作技能，才能对故障现象做出准确的分析和判断，排除故障的能力也有个不断学习、总结和提高的过程。这里仅就电路原理中可能会遇到的一些常见故障、发生原因及排除方法做简要的介绍。

一、实验故障及故障产生的原因

(1) 开路故障。故障现象一般为无电压、无电流、无任何声响与异常，只是仪表不偏转，示波器不显示波形等。

产生原因是电路有断开处，保险丝熔断，导线有断线处，元器件有断开处，接线端子、插接件连接不好或没接触上，接线端子松动，焊片脱离，开关内部通断位置不对应等。

(2) 短路故障。属破坏性故障，一定要防止。故障现象为电流急剧增大、表针打弯或电源保险烧断，元器件损坏或元器件发热厉害，有冒烟、烤焦、异味等。

产生原因多数为线路连接错误。如电源输出端或线路端子间距离近，被接线叉子外露部分短路等原因，造成电压源输出端被短接；调压器或变压器接反，把低电压或 0 输出侧接到 220V 电源上；也可能由于电路参数选择错误，把小阻值负载当成大阻值负载用；可调电阻的可调输出端误放在很小（初始值一般应该在较大位置）或接近 0 位置；测量时误用内阻很小的电流表并在电源或大阻值负载的两端，相当于用电流表去测电压；电路复杂，多余的连线把电源间接短接；电感器件被接到直流电源上；接在电路上的电容元件已击穿

短路、极性接反等。

(3) 其他故障，故障现象多变；如测试时数据时大时小，测一次一个数；测试的数据与预先估算值相差较远；表针指示突然变大；某器件过热。

产生原因大多是接触不良或仪表、器件选择不当引起。如接线端与导线叉接触松动，线路焊接不牢固或虚焊，导线似断非断。开关、刀闸本身接触不好；调压器炭刷接触不好，某位置没输出，而某位置突然有输出但超过需要值；仪表测量机构部分阻尼不好，机械部分位置多变；测试仪表与电路参数不搭配，如电路总阻抗很小，而测量时串联电流表阻值又偏大；被测器件阻值很大，并联电压表内阻又偏小；表的量程选择不当；多量程仪表、仪器的旋钮错位；调试方法错误，用电流表或欧姆表去测电源电压；电路带电，有其它并联和相关支路情况下去测电阻；元器件参数容量选择不当，通过元件电流超过允许值，器件发热时间长，特性变化等等。

(4) 元器件损坏。故障现象为电阻器件、电感器件过热烧坏，二极管、晶体管击穿，电容器击穿、放炮。

产生原因为通过电阻、电感线圈的电流超过允许值；外加电压升高使流过器件的电流增加，通电时间长散热又不好；电容极性接反，元件电压等级小于使用电压；极性电容器用在交流电路等。

二、实验故障的一般排除方法

实验中电路故障的原因多种，现象多样，但其实质无非是断（开路）、短（短路）、接触不良（时通时断），或使用错误、如量程、容量、额定值选择不当，或者测试点、测试线连接不对等。

(1) 短路故障的排除方法。短路故障，后果严重，应立刻断电检查。可直接查看或采用测电阻法找出短路（电阻很小接近零）故障点，纠正错误的测试方法和接线错误等。

(2) 断（开）路故障的排除方法。断路、开路故障时，由于电路不通没有电流，一般直观看不出，但不等于电路没有电压，更不等于电路没有危险。排除方法如下：

1) 采用断电后测电阻法。先把电路与电源断开，检查电源保险丝是否烧断，若保险丝未烧断，再逐个进行元件、导线的通断检查。器件、导线两端电阻正常时，应为很小或有一定阻值，如果为无限大，说明断了。逐个依次查，直到查出断点为止。

2) 采用电路带电测电压法。用电压表直接找电压等于电源电压的两点。如果是一根导线或一个器件两端电压等于电源电压,说明这根导线或这个器件断,因正常时导线两端电压应为 0 或者很小,逐段检查,直到查出断点为止;也可以用电压表先从电源输出端量起,先看电源有无电压输出,如果有电压,可以一个表笔不动,而另一个表笔往下移动,直到电压表测不出电压时,说明这点与前一点之间是断开的,再根据情况判断是导线、器件或其它连接部分何处断(开)路。

(3) 接触不良的排除方法。接触不良现象多样,可同样采用上述两种方法进行检查,但可能一下查不出,因故障现象可能在某一位置暴露,某一位置又不明显。查的过程要想想办法,将被查可疑部分变换位置或稍微晃动,使故障点暴露后便于检查和排除。

(4) 过载、过热、烧坏、过量程、放炮等故障的排除方法。要从参数、量程,容量的选择配合上是否合适,使用测量时连接是否正确等方面找原因,或察看是否有元器件容量不够、质量差、标称不符、旋钮位置不对应等。

但不管采取什么方法,怎么检查故障,都要在明确被测被查器件或被查部分的正常情况和故障情况的区别的前提下进行,否则怎么查也不易把故障查出,更不可能尽快排除故障。

第二章 实验内容

实验一 计算机辅助电路仿真技术

一、实验目的

1. 了解计算机辅助电路仿真技术的发展。
2. 学习仿真软件 PROTEUS 的基本使用方法。

二、原理说明

计算机仿真技术随着计算机的普及，得到越来越广泛的应用。电路仿真软件利用现代计算机的高速运算能力和海量存储，把大量的电子元器件的输入输出特性利用数学建模的方法进行模拟它们在电路中的表现，并在软件中提供大量的虚拟测试工具如虚拟示波器、电流探针、电压探针等，让工程师可以在不搭建硬件环境的情况下开展电路设计和对电路进行调试分析，是当前电子设计的主要手段。

三、实验内容

（一） Proteus 简介

Proteus 是世界上著名的 EDA 工具，从原理图布图、代码调试到单片机与外围电路协同仿真，一键切换到 PCB 设计，真正实现了从概念到产品的完整设计。是目前世界上唯一将电路仿真软件、PCB 设计软件和虚拟模型仿真软件三合一的设计平台。

Proteus 具有的主要功能如下：

1、智能原理图布图

2、强大的电路仿真功能：

（1）支持数字/模拟的混合仿真，

（2）丰富的仿真器件（既有大量的内部器件库，也可从外部导入或自创），

(3) 多样的信号源（直流、正弦、脉冲、分段线性脉冲、音频等）与虚拟仪器（示波器、逻辑分析仪、信号发生器、电压/电流表等），

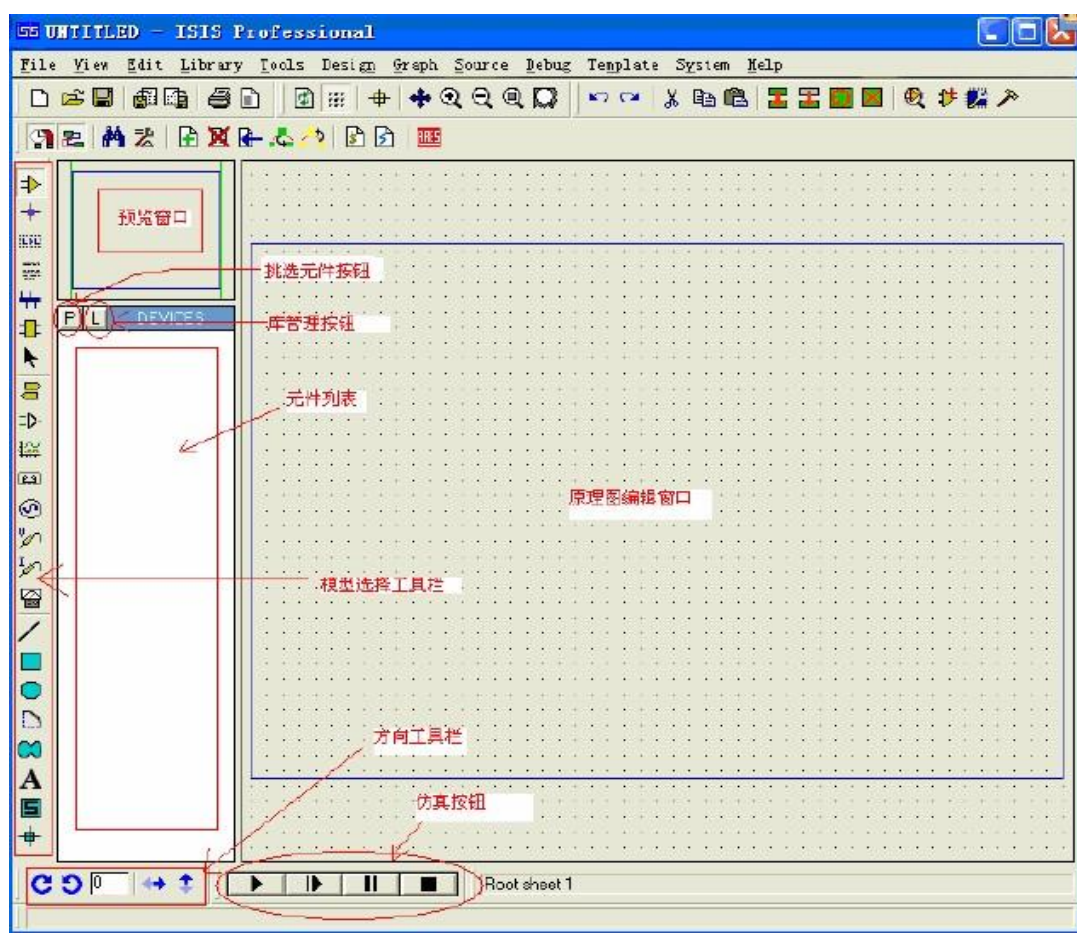
(4) 生动的仿真显示：用色点显示引脚的数字电平，导线以不同颜色表示其对地电压大小，结合动态器件（如电机、显示器件、按钮）的使用可以使仿真更加直观、生动等。

3、单片机与外围电路协同仿真

4、PCB 设计平台

(二) proteus 7界面简介

安装完 Proteus 后，运行 ISIS 7 Professional，出现以下界面：



下面分别对窗口内各部分的功能进行说明（见上图）。

1、原理图编辑窗口（The Editing Window）：顾名思义，它是用来绘制原理图的。蓝色方框内为可编辑区，元件要放到它里面。注意，这个窗口是没有滚动条的，你可用预览窗口来改变原理图的可视范围。

2、预览窗口（The Overview Window）：它可显示两个内容，显示元件的预览图或原理图编辑窗口的可视范围。

3、模型选择工具栏（Mode Selector Toolbar）：

（1）主要模型（Main Modes）：

- 1* 用于即时编辑元件参数（先单击该图标再单击要修改的元件）
- 2* 选择元件（components）（默认选择的）
- 3* 放置连接点
- 4* 放置标签（用总线时会用到）
- 5* 放置文本
- 6* 用于绘制总线
- 7* 用于放置子电路



（2）配件（Gadgets）：

- 1* 终端接口（terminals：有 VCC、地、输出、输入等接口）
- 2* 器件引脚：用于绘制各种引脚
- 3* 仿真图表（graph）：用于各种分析，如 Noise Analysis
- 4* 录音机
- 5* 信号发生器（generators）
- 6* 电压探针：使用仿真图表时要用到
- 7* 电流探针：使用仿真图表时要用到
- 8* 虚拟仪表：有示波器等



(3) 2D 图形 (2D Graphics) :



4、元件列表 (The Object Selector) : 用于挑选元件 (components)、终端接口 (terminals)、信号发生器 (generators)、仿真图表 (graph) 等。举例, 当你选择“元件 (components)”, 单击“P”按钮会打开挑选元件对话框, 选择了一个元件后 (单击了“OK”后), 该元件会在元件列表中显示, 以后要用到该元件时, 只需在元件列表中选择即可。

5、方向工具栏 (Orientation Toolbar) : 90 度旋转; 翻转 (水平或垂直)

6、仿真工具栏



1* 运行; 2* 单步运行; 3* 暂停; 4* 停止。

(三) Proteus VSM平台操作简介与示例

Proteus VSM (virtual simulator module 意为虚拟仿真模型), 可以利用大量器件模型进行模拟、数字电路设计乃至单片机进行仿真设计。它允许对电路设计采用图形环境, 在这种环境中, 你可以使用一个特定符号来代替元器件, 并完成不会对真实电路造成任何损害的电路仿真操作。它可以仿真仪表以及可描述在仿真过程中所获得的信号的图表。

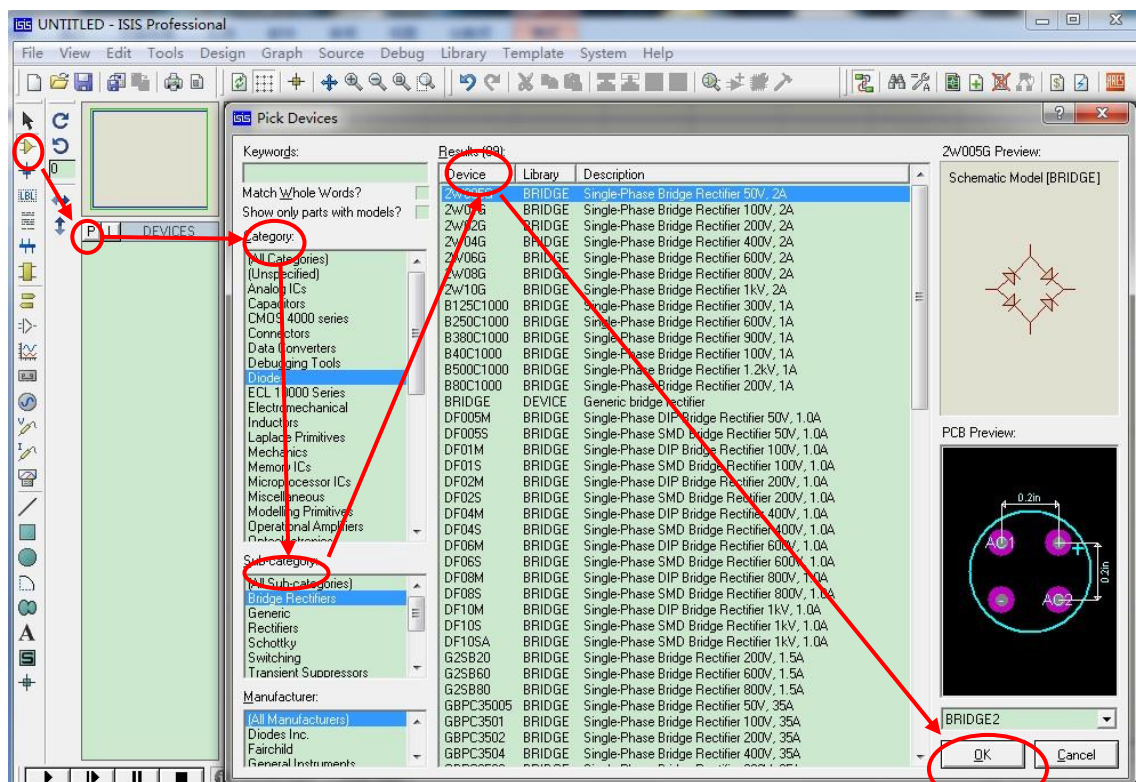
原理图编辑操作: 绘制原理图要在原理图编辑窗口中的蓝色方框内完成。原理图编辑窗口的操作是不同于常用的 WINDOWS 应用程序的, 正确的操作是: 用左键放置元件; 右键选择元件; 双击右键删除元件; 右键拖选多个元件; 先右键后左键编辑元件属性; 先右键后左键拖动元件; 连线用左键, 删除用右键; 改连接线: 先右击连线, 再左键拖动; 滚动鼠标滚轮可放缩原理图。

示例: 简单整流电路

(1) 选择器件 (以整流桥的选择为例)

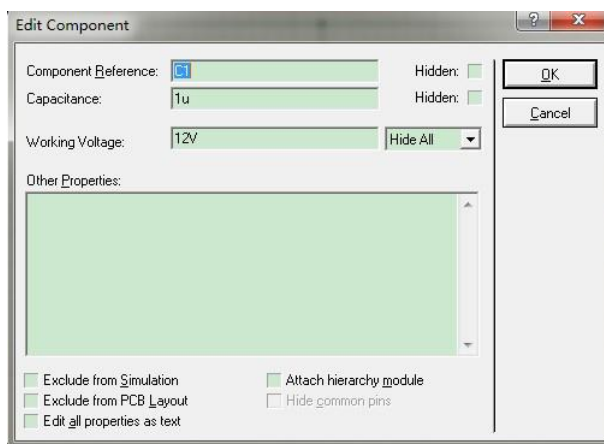
点击左侧工具栏的 component mode → pick device 在库管理按钮点击 P 图标 → 在 categories 里选择 diodes → 在 Sub-category 里选择 Bridge Rectifier → 在 Manufacturer 里可选择器件的生产公司 → 在 Device 里选择 2W005G, 点击“OK” → 在原理图编辑窗口你想要放置元器件的位置单击左键。

也可直接在 keyword 框输入关键字直接搜索器件。
示意图如下：（选择其他器件的步骤类似）



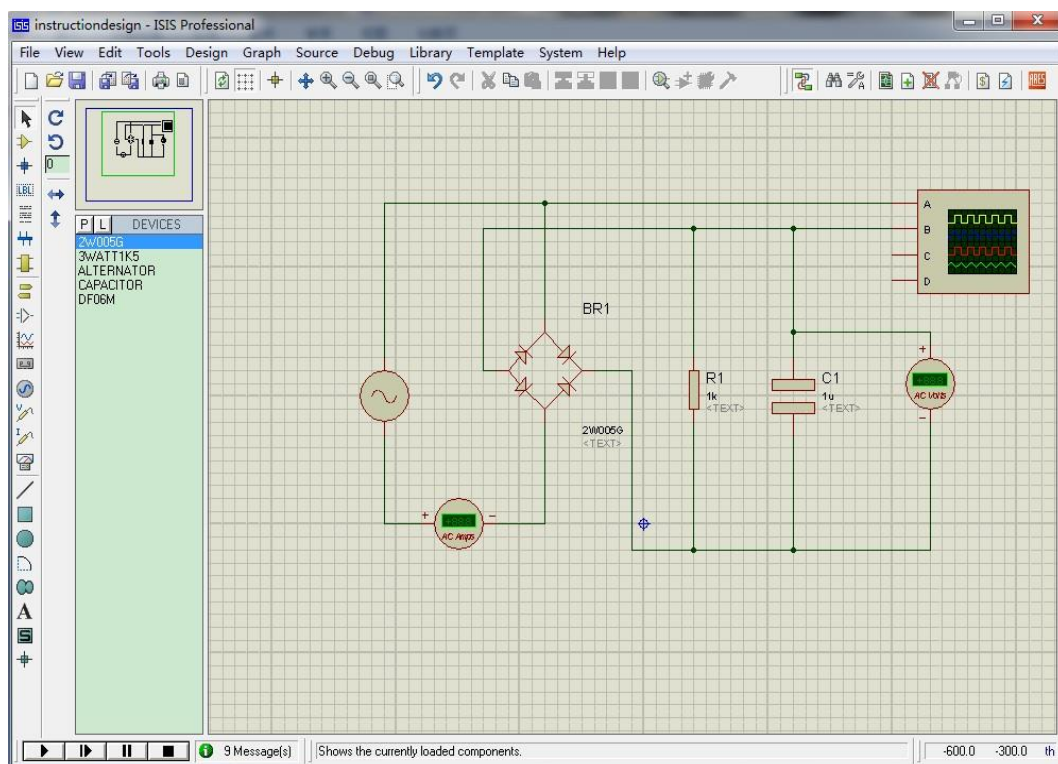
（2）编辑器件参数

在原理图窗口双击你想要编辑参数的器件，则弹出编辑窗口（以电容为例）如下：



可以对其进行重命名，改变电容值，和改变工作电压等。

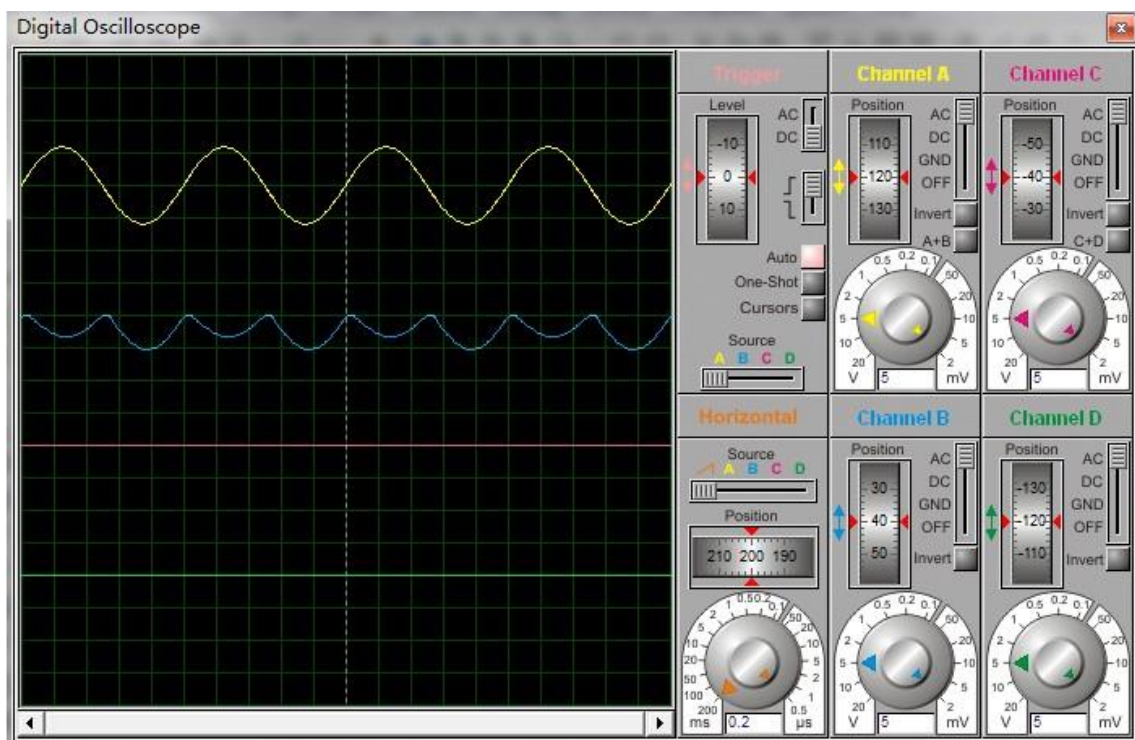
(2) 连接器件（可以选完器件后才连接也可以边选边连）



布置好电路原理图后，将文件保存，然后点击左下角的运行图标，则电路开始运行。

(3) 利用虚拟仪表分析电路

运行电路，可以看到交流电压表和电流表实时显示出测量数值，并且弹出虚拟示波器的操作界面。进行相关调节后可看到 channel A 与 channel B 的显示如图：



(四) 附录

1、常用器件和工具

(1) Pick Device→Categories→Resistor (电阻) /Capacitor (电容) /Inductor (电感)

(2) Pick Device→Categories→Simulator Primitives→

Alternator (交流电源) / Battery (稳压电源) /Csource (电流源) /Clock (方波时钟) /多种数电基本门电路

(3) 主界面左侧的工具栏的 virtual instruments mode :

Oscilloscope (虚拟示波器)、Signal generator (信号发生器)、

DC voltmeter (直流电压表)、DC ammeter (直流电流表)

AC voltmeter (交流电压表)、AC ammeter (交流电流表) 等

2、数电的仿真类似，但很多芯片的电源和接地引脚常常已经被默认连接好。

3、另外，在安装目录下的 sample 文件夹里有很多例子，可以打开进学习和参考。

四、实验要求

1. 用仿真环境实现实验三全部实验要求，掌握虚拟元器件与虚拟电表与探针的用法；
2. 用仿真环境实现实验六全部实验要求，掌握虚拟信号源和虚拟示波器以及分析图表的使用方法。

五、预习要求

1. 提前在自己个人电脑上安装 PROTEUS 7.X 版软件；
2. 在网络上阅读 PROTEUS 软件教程，提前学习软件功能与操作指南。

实验二 实验仪器使用入门

一、实验目的

- (1) 了解实验中使用到常见仪器设备的基本功能和原理。
- (2) 掌握实验室仪器设备的基本使用方法。

二、原理说明

- (1) 直流稳压电源是所有电子电工实验必备的实验设备。它为电子电路提供一路或多路稳压电源，并且可以设置每一路电源的输出最大电流。当输出电流小于设定值时，电源工作于稳压状态（CV），输出电压自动稳定在用户设定的电压；当输出电流超过电流设定值时，电源会自动调低输出电压，使输出电流不超过设定值，此时电源工作在限流模式（CC）。每组电源输出，都有两个输出端子，一般标记正（+）负（-），输出电流从正端流出到用户电路，从负端流回稳压电源；根据需要，可以把多组电源串联组成正负电源供电。现代先进数控直流稳压电源，都配置了数字显示系统，可以实时显示当前每组电源的输出电压电流和功率等实时工况；可以通过面板操作设置各路电源的输出电压和限定电流；可以编程控制电源的输出序列；可以通过 USB 口或 LAN 口本地或远程控制电源的各项功能。
- (2) 台式万用电表，是用于测量电路中的各种基本电参数的设备，既可以测量交直流电压、电流，频率；又可以测量电阻阻值、电容值和二极管导通电压等参数，还可以测量各种传感器的输出，并转换成相应的物理量值（如温度）。万用电表的主要技术指标是测量精度，通常有 3½、4½、5½、6½ 位等不同规格，以 5½ 位的万用表为例，它可以显示 6 位数字，第一位数字只能显示 0 或 1，也就是半位，后面可以显示 5 位数字；测量显示的位数越多，说明仪表的分辨率越高，精度也越高。现代高级万用表，不仅测量精度高，还可以通过 USB 口或 LAN 口本地或远程控制万用表的各项功能，也可以作为数字采集卡使用。
- (3) 函数信号发生器，是用于提供各种类型的测试信号的仪器。它提供的信号也是电路中的源，这种源不提供功率，只提供各类测试信号，所以不能用于测试电路的

供电电源。函数信号发生器可以输出预设频率幅度的正弦信号、三角波信号、方波和脉冲信号，方波和脉冲波的占空比可调；也可以输出自行设计编辑任意波形的信号。函数信号发生器的输出阻抗是固定的 $50\ \Omega$ ，在设置输出幅度时要特别注意，输出通道通常有两种负载阻抗模式可以由用户设定。第一种是高阻模式，此时默认用户电路的输入阻抗比较大，输出信号基本上绝大部分的串联分压都分给了负载，此时，信号源设置的输出幅度就是实际输出的信号幅度，也就是说，信号源空载和带负载情况下的实际输出信号幅度基本相同，在这种情况下，如果用户电路的输入阻抗不是很大时，那么，实际输出的信号幅度会小于信号源设置的输出幅度，因为部分输出信号的电压被内阻分走了一部分；第二种是 $50\ \Omega$ 模式，此时，已知用户电路的输入阻抗是 $50\ \Omega$ ，信号源内阻也是 $50\ \Omega$ ，这种情况下，在信号源空载时，信号源的输出信号幅度是输出设置幅度的 2 倍，当接入负载后，由于负载和内阻各分配到一半的信号源电压，此时的输出信号幅度与设置输出幅度相同。可以通过 USB 口或 LAN 口本地或远程控制函数信号发生器的各项功能。多路输出信号源，还可以设置多个通道之间输出信号的相位关系。

- (4) 数字混合信号示波器，是用于把虚无缥缈的电子信号图形化显示及测量的电子设备。所谓的混合信号示波器，是既可以测量显示 2-4 通道的模拟信号，又可以测试显示 8-16 通道的数字逻辑信号，是传统模拟信号示波器+逻辑分析仪的组合物。示波器可以把电信号的幅度变化随时间变化的情况，用图形的方式直观的展示出来，也就是画出信号的 V-T 图，横轴是时间，纵轴是信号幅度。现代数字示波器的采样率高达每秒 1G 次以上，可以采集到高速信号随时间变化的规律，并绘制图形，图形的时间精度很高，可以用于信号时间特性的测量。示波器通常显示的是周期性信号的一个局部，然后，不断地把这个选定的局部实时刷新显示在屏幕上，并可以通过示波器的水平选项，控制被选择显示的时间范围和位置。示波器也内置了各种测量功能和数据计算功能，可以测量出信号的各种参数。示波器是一种观测仪器，不会影响被测信号原有的幅度和时间特性，类似于望远镜和显微镜，可以观测研究对象但并不改变研究对象。

- (5) 实验箱是为了方便开展实验，提供的包括基本元器件、课程学习研究对象、基本功能电路和基本电源信号源的实验资源集合。不同的实验内容会配套不同功能的实验箱。通常实验箱内部提供的基本电源信号源和测量仪器的功能都比较简单，保护设计也不足，使用时需要了解使用注意事项，避免超限使用导致损坏。课程研究对象和基本功能电路，为初学者带来便利，可以提升实验效率和培养实验操作习惯，为以后电路设计和电路分析打好基础提供条件。

三、实验内容

- (1) 直流稳压电源与台式万用表使用操作入门。

- a) 设置直流稳压电源通道 **1** 输出电压=2.4V，限制电流=100mA。分别连接通道 **1** 输出 (+) (-) 端子到实验箱上 120 Ω /2W 电阻和 51 Ω /2W 电阻两端，分别使用万用表的 DC V (直流电压) 档和 DC I (直流电流) 档，测量电源输出到电阻的电压和电流值并记录，同时记录电源显示的输出电压和电流值以及它们的设定值；
- b) 设置直流稳压电源通道 **2** 输出电压=15.3V，限制电流=200mA。分别连接通道 **2** 输出 (+) (-) 端子到实验箱上 120 Ω /2W 电阻和 51 Ω /2W 电阻两端，分别使用万用表的 DC V (直流电压) 档和 DC I (直流电流) 档，测量电源输出到电阻的电压和电流值并记录，同时记录电源显示的输出电压和电流值及它们的设定值；
- c) 设置直流稳压电源通道 **3** 输出限制电流=50mA。分别连接通道 **3** 输出 (+) (-) 端子到实验箱上 120 Ω /2W 电阻和 51 Ω /2W 电阻两端，分别使用万用表的 DC V (直流电压) 档和 DC I (直流电流) 档，测量电源输出到电阻的电压和电流值并记录，同时记录电源显示的输出电压和电流值及它们的设定值；
- d) 使用万用表的二极管档测量实验箱上的 1N5401 二极管，红黑表笔分别测量正向和反向接线时，记录万用表的度数；
- e) 使用万用表的电容档测量实验箱上的电容，记录万用表的度数；
- f) 使用万用表的 SENSOR 档，外接热电偶传感器，测量环境温度并记录。

- (2) 函数信号发生器与混合信号示波器使用操作入门。

- a) 设置函数信号发生器通道 **1** 输出 $V_{P-P}=500\text{mV}$ ， $f=50\text{Hz}$ ，**OFFSET=0V** 的正弦波，

连接通道 1 输出红黑端子到实验箱上 $1\text{K}\Omega$ 电阻两端，分别用万用表 AC V（交流电压）档和 AC I（交流电流）档，测量并记录电阻两端的交流电压和交流电流值；用万用表的频率档测量信号频率；用示波器通道 1 观察电阻两端的电压波形并记录，调整示波器的水平、垂直和触发等参数，使示波器屏幕上显示 2-3 个完整信号周期，信号幅度占屏幕高度的四分之三左右，波形稳定不移动，并使用示波器自带的测量功能测量信号的峰峰值、幅值、有效值和频率；

- b) 设置函数信号发生器通道 2 输出 $V_{p-p}=500\text{mV}$ ， $f=50\text{Hz}$ ，**OFFSET=500mV** 的正弦波，连接通道 2 输出红黑端子到实验箱上 $1\text{K}\Omega$ 电阻两端，分别用万用表 AC V（交流电压）档和 AC I（交流电流）档和 DC V（直流电压）档和 DC I（直流电流）档，测量并记录电阻两端的交流电压和交流电流值；用万用表的频率档测量信号频率；用示波器通道 2 观察电阻两端的电压波形并记录，调整示波器的水平、垂直和触发等参数，使示波器屏幕上显示 2-3 个完整信号周期，信号幅度占屏幕高度的四分之三左右，波形稳定不移动，观察示波器通道 2 选用直流或交流耦合方式下的波形有什么变化，并使用示波器自带的测量功能测量信号的峰峰值、幅值、有效值和频率；
- c) 观察在保持函数信号发生器 a, b 情形下设置不变，改变通道设置“同步”前后已及其中一个通道设置相移 180° 以后的示波器同时显示的 2 个波形变化并记录；
- d) 改变示波器水平控制时基选项，从 Y-T 调整为 Y-X，观察并记录李萨茹图；
- e) 改变函数信号发生器的波形选项，重复上述实验过程并记录。

四、实验注意事项

- (1) 电路连接后，检查无误再接通电源。
- (2) 电压表应与被测电路并联，电流表应与被测电路串联，电压档与电流档的接线端子不同，一定要注意及时切换，并且都要注意正、负极性接法与量程的选择对测量结果的影响。
- (3) 函数信号发生器与示波器的探头都有正负之分，测量时一定要正接正、负接负。
- (4) 实验过程中需密切监测仪器的显示情况，有异常问题需要及时处理。

五、预习及思考题

- (1) 了解各种测量仪器的工作原理。
- (2) 了解直流信号和交流信号的定义，掌握正弦交流信号的峰峰值、幅值、有效值的定义和测量方法。
- (3) 如何用一路直流方波信号和各种测量仪器，验证信号有效值的定义。

六、实验报告

- (1) 列表记录实验数据。
- (2) 分析实验结果，写出心得。

七、实验用仪器、仪表、设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱		1	
2	直流稳压电源	0-30V, 0-30V, 0-5V	1	DP832A
3	台式万用表	5 位半	1	DM3058
4	信号发生器	100MHZ, 双路	1	DG4102
5	混合信号示波器	200MHZ, 2 模拟通道, 16 数字通道	1	MS02202A
6	2 号导线		N	

实验三 元件伏安特性的测量

一、实验目的

- (1) 学习线性电阻元件和非线性电阻元件伏安特性的测试方法。
- (2) 学习直流稳压电源、万用表、直流电流表、电压表的使用方法。

二、实验原理及说明

(1) 元件的伏安特性。如果把电阻元件的电压取为横坐标（纵坐标），电流取为纵坐标（横坐标），画出电压和电流的关系曲线，这条曲线称为该元件的伏安特性。

(2) 线性电阻元件的伏安特性在 $\mu - i$ （或 $i - \mu$ ）平面上是通过坐标原点的直线，与元件电压或电流的方向无关，是双向性的元件，如图 1，元件上的电压和元件电流之间的关系服从欧姆定律。元件的电阻值可由下式确定： $R = \frac{\mu}{i} = \frac{m_u}{m_i} \tan \alpha$ ，其中 m_u 、 m_i 分别为电压和电流在 $\mu - i$ 平面坐标上的比例尺， α 是伏安特性直线与电流轴之间的夹角。我们经常使用的电阻器，如金属膜电阻、绕线电阻等的伏安特性近似为直线，而电灯、电炉等器件的伏安特性曲线或多或少都是非线性的。

(3) 非线性电阻元件的伏安特性不是一条通过原点的直线，所以元件上电压和元件电流之间不服从欧姆定律，而元件电阻将随电压或电流的改变而改变。有些非线性电阻元件的伏安特性还与电压或电流的方向有关，也就是说，当元件两端施加的电压方向不同时，流过它的电流完全不同，如晶体二极管、发光管等，就是单向元件，见图 2。

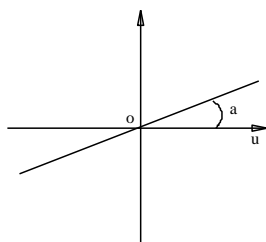


图 1

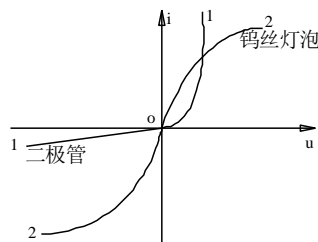


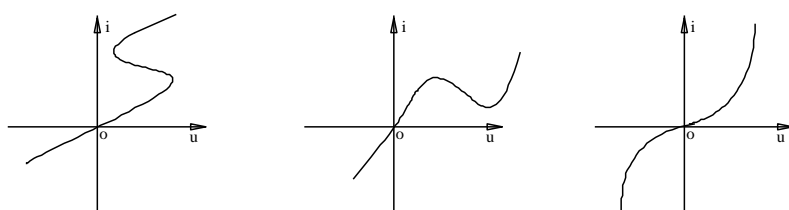
图 2

根据常见非线性电阻元件的伏安特性，一般可分为下述三种类型：

1) 电流控制型电阻元件。如果元件的端电压是流过该元件电流的单值函数, 则称为电流控制型电阻元件, 如图 3 (a) 所示。

2) 电压控制型电阻元件。如果通过元件的电流是该元件端电压的单值函数, 则称为电压控制型电阻元件, 如图 3 (b) 所示。

3) 如果元件的伏安特性曲线是单调增加或减小的。则该元件既是电流控制型又是电压控制型的电阻元件, 如图 3 (c) 所示。



(a) 电流控制型

(b) 电压控制型

(c) 既是电压控制又是电流控制

图 3 非线性元件伏安特性

(4) 元件的伏安特性, 可以通过实验方法测定。用电流表、电压表测定伏安特性的方法, 叫伏安法。测试线性电阻元件的伏安特性, 可采用改变元件两端电压测电流的方法得到, 或采取改变通过元件的电流而测电压的方法得到。

非线性电阻元件的伏安特性, 可根据元件类型选择方法。即:

1) 电压控制型的, 用电压作自变量, 即改变电压测电流的方法。

2) 电流控制型的, 用改变电流测电压的方法。

(5) 说明。为便于比较和加深理解, 本实验采用测试最常见最有代表性和用得最多的无方向线性电阻元件和非线性有方向的电阻元件(二极管和发光二极管)的伏安特性。而且有向与无向元件都进行正反特性的测量, 以利于概念的掌握。

三、实验电路及元器件参数

本实验采用电路原理实验箱《元件伏安特性的研究》单元。其中 μ_s 是接电源端口，+接直流稳压电源“+”端，-接直流稳压电源“-”端。

线性电阻元件 $R_1 = 120\ \Omega / 2W$, $R_2 = 51\ \Omega / 2W$;

非线性电阻元件 D3 为二极管 1N5401, D4 为发光二极管高亮 $\phi 3$;

电位器 R_w 又叫三端变阻器，有两个固定端，一个可调端，可接成固定电阻、可调电阻和分压器三种形式。测量任意电路电压电流值时，需短接 D1D2。

四、实验内容及方法步骤

(1) 测试线性电阻元件的伏安特性。用电压表和电流表分别采用方法一（电流表外接法）和方法二（电压表外接法）的两种接线方法进行测试，比较测试结果。

1) 线性电阻元件的正向特性测量，分别采用方法一和方法二，电路见图 4。电压表可不用固定接在电路中，电压表两端接专用带测试表笔的导线，测量时直接用测试表笔插到测试点既可。电源的输出电压要从 0 开始，调到电压（电流）为各给定值时（见附表 1、附表 2），对应测出电流（电压）值，方法一测出的数据对应记入附表 1、附表 2。方法二的测试数据对应记入附表 3、附表 4。注：测得值大于实验箱上仪表值时，应外接万用表。

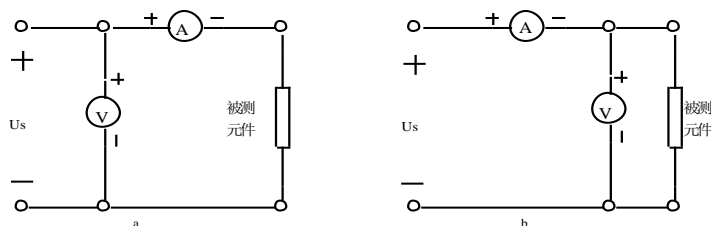


图 4

2) 反向特性测量，改变加在电阻元件两端电压的方向，测量时应注意电压表，电流表正负极接入的方向。重复上述内容，结果对应记入附表 1、附表 2、附表 3、附表 4。这四个附表头上的 R 等于多少欧姆，可用万用表直接测出所用电阻 R 的值后填入。

3) 计算电阻值，是根据测量的电压、电流值进行计算，结果记入对应附表中既可。

(2) 测试非线性电阻元件 D3（二极管）、D4（发光二极管）的伏安特性。

1) 正向特性的测试。测电流用毫安表,测电压可用万用表直流 50V 档,分别在元件 D3、D4 正极接电流表“-”端,电流表“+”端再接直流稳压电源“+”端或高电位端,如图 4 所示,D3、D4 的负极接电源“-”端。测量时无论监视电压读电流,还是监视电流读电压,采用方法一或方法二,电源电压都应从 0 起调。为使特性曲线测得准确,先从低到高给出一定电压(电流)值(不能超过规定值),预测一次,由预测结果描出曲线的草图,然后再根据曲线形状合理选取电压(电流)值进行正式测量。曲线曲率大的地方,测量点要选密些,反之疏些,一定要测出拐点、导通电压(电流突然变大)等有特征的点,达到能完整、真实的测出元件的特性曲线。测量结果记入附表 5、附表 7、附表 9、附表 11。

2) 反向特性的测试。D3 或 D4 负极接直流电源“+”端(高电位端),正极接直流电源“-”端,测电流用万用表微安档或微安表,测电压用 $\pm 50\text{V}$ 电压表或数字万用表,其它同 1),测试结果记入附表 6、附表 8、附表 10、附表 12。因各管特性不完全相同,所以表格只给出 0 和最高限额值:电压 10V,电流 10mA;其他值由测试者自定。

五、测试记录表格

自行拟制。

六、实验注意事项

(1) 每次测量前,或测量后都要将稳压电源的输出电压调回到零值。

(2) 接线时一定要考虑正确使用导线,如线的颜色、长短,线两端的插头形状及是否要用专用线等。

(3) 非线性电阻元件伏安特性的测定,要注意测试的正确方法,选择合理的接线方式和测点,尤其在曲线的极值点和拐点附近应多选几个测试点。

(4) 线性电阻元件外加正向电压和反向电压值要对应相等,比如 $+5\text{V}$ 、 -5V 、 $+10\text{V}$ 、 -10V 。而非线性元件如二极管,发光二极管测试时要注意观察正向电流、反向电压不能超过规定值,所加正反向电流、电压值绝对不能相等,否则会导致元器件损坏。

(5) 由于仪表的内阻会影响测量的结果,因此必须注意仪表接法不同时对测试结果的影响。分析与观察不同接法时测量值的差异,并找出原因。

(6) 测量 D4 时需串接 $1\text{k}\Omega$ 电阻 (内部已连好)。

七、预习及思考题

(1) 预习实验内容, 明了电阻元件、二极管伏安特性的区别和测试方法。

(2) 线性电阻元件的两个特殊情况“开路”、“短路”的含义是什么?

(3) 试说明可调三端电阻最常见的三个用途, 最好能画图说明。

(4) 电流表应与被测元件_____联, 电压表应与被测元件_____联, 电流表、电压表都有内阻, 而电流表内阻应越_____越好, 电压表内阻应越_____越好, 为什么?

(5) 试分析接入电路的电流表内阻大、电压表内阻小时, 对测试结果有何影响?

(6) 如果被测元件阻值小应采用电流表外接法不是电压表外接法? 被测元件阻值大又应如何连接? 为什么?

八、实验报告要求

(1) 回答预习与思考题中各问题。

(2) 分别画出方法一、方法二的测试电路图, 比较方法一与方法二测试结果是否相同, 为什么?

(3) 认真填写报告中各项内容。

(4) 分别在附表图 1 的 $\mu - i$ 、 $i - \mu$ 平面上按比例画出 R1、D3、D4 的伏安特性曲线。用作图法求出 R 值, 并与测量值和计算值进行比较。

九、实验用仪器、仪表、设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱	元件伏安特型的研究	1	
2	直流稳压电源	0~30V	1	
3	直流电流表	0~30mA	1	

4	直流电压表	0~30V	1	
5	电流表专用线	一端耳机插头、 一端 2 号镀金插头	2	
6	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

实验四 基尔霍夫定律

一、实验目的

- (1) 加深对基尔霍夫定律的理解。
- (2) 学习验证定律的方法和仪器仪表的正确使用。

二、实验原理及说明

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律，包括电流定律（KCL）和电压定律（KVL）。

基尔霍夫定律规定了电路中各支路电流之间和各支路电压之间必须服从的约束关系，无论电路元件是线性的或是非线性的，时变的或是非时变的，只要电路是集总参数电路，都必须服从这个约束关系。

(1) 基尔霍夫电流定律（KCL）。在集总电路中，任何时刻，对任一节点，所有支路电流的代数和恒等于零，即 $\sum i = 0$ 。通常约定，流出节点的支路电流取正号，流入节点的支路电流取负号。

(2) 基尔霍夫电压定律（KVL）。在集总电路中，任何时刻，沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零，即沿任一回路有 $\sum u = 0$ 。在写此式时，首先需要任意指定一个回路绕行的方向。凡电压的参考方向与回路绕行方向一致者，取“+”号；电压参考方向与回路绕行方向相反者，取“-”号。

(3) KCL 和 KVL 定律适用于任何集总参数电路，而与电路中的元件的性质和参数大小无关，不管这些元件是线性的、非线性的、含源的、无源的、时变的、非时变的等，定律均适用。

三、实验电路及元器件参数

本实验采用电路原理实验箱《基尔霍夫定理的验证》单元，电路中 U_{sa} 、 U_{sb} 分别接直流稳压电源，“+”端接稳压电源“+”端，“-”端接稳压电源“-”端。 U_{sa} 、 U_{sb} 电压值（0~12V）自选。电路中参数 $R_1=R_2=R_3=220\ \Omega$ ； $R_4=270\ \Omega$ ； $R_5=200\ \Omega$ ； $R_6=240\ \Omega$ 。D1~D6 均为发光二极管（非线性）。

根据已知条件，可自行设计对称、不对称、线性、非线性、单电源或双电源电路。

四、实验内容及方法步骤

(1) 验证 (KCL) 定律, 即 $\sum i = 0$ 。分别在自行设计的电路或参考的电路中, 任选一个节点, 测量流入流出该节点的各支路电流数值和方向, 记入附表 1~5 中并进行验证。参考电路见图 1、图 2、图 3 所示。

(2) 验证 (KVL) 定律, 即 $\sum u = 0$ 。分别在自行设计的电路或参考的电路中任选一网孔 (回路), 测量网孔内所有支路的元件电压值和电压方向, 对应记入附表并进行验证。参考电路见图 3。

五、测试记录表格

自拟表格。

六、实验注意事项

(1) 自行设计的电路, 或选择的任一参考电路, 接线后需经教师检查同意后再进行测量。

(2) 测量前, 要先在电路中标明所选电路及其节点、支路和回路的名称。

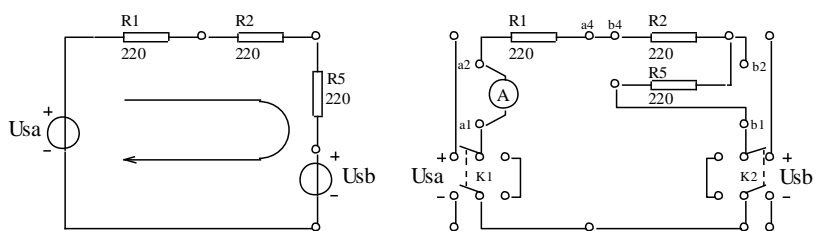
(3) 测量时一定要注意电压与电流方向, 并标出 “+”、“-” 号, 因为定律的验证的代数和相加。

(4) 在测试记录表格中, 填写的电路名称与各参数应与实验中实际选用的标号对应。

七、预习及思考题

(1) 什么是基尔霍夫定律, 包括两个什么定律?

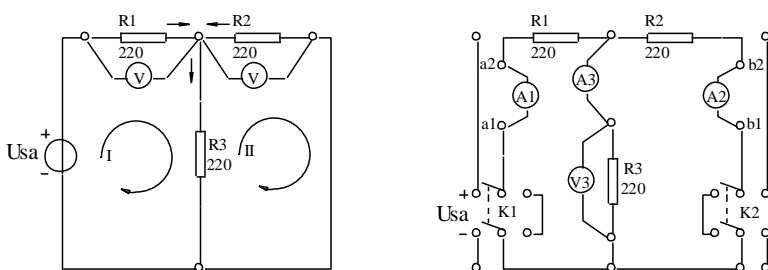
(2) 基尔霍夫定律适用于什么性质元件的电路?



(a) 电路原理示意图

(b) 电路接线图

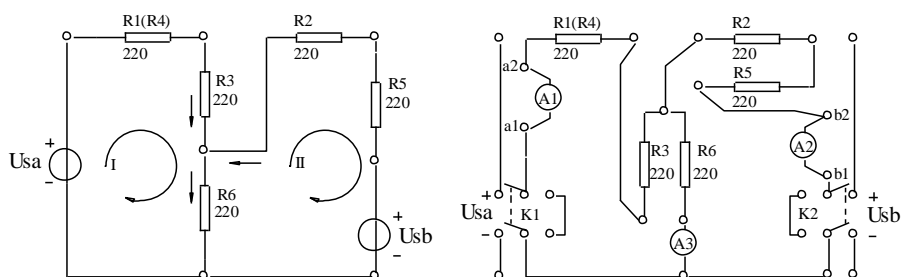
图 1 验证基尔霍夫定律电路之一



(a) 电路原理示意图

(b) 电路接线图

图 2 验证基尔霍夫定律电路之二



(a) 电路原理示意图

(b) 电路接线图

图 3 验证基尔霍夫定律电路之三

八、实验报告要求

(1) 画出自拟电路，标明选用的电路参数、电流方向、回路绕行方向和所选节点与回路名称等。

(2) 完成实验报告中各项内容。

(3) 举一两个例子，比较实测值与计算值是否相同？试分析原因。

(4) 测试中，如果使用的电流表内阻较大，为 $30\ \Omega$ ，电压表内阻较小，为 $200\ \Omega$ 时，试分析对测量结果有何影响？

九、实验用仪器、仪表、设备

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板		1	
2	稳压源	$0\sim 24\text{V}$ ， $+12\text{V}$ 或 5V	1	
3	直流电流源	$0\sim 50\text{mA}$	1	
4	直流电流表	$0\sim 30\text{mA}$	3	
5	直流电压表	$0\sim 30\text{V}$	2	
6	电流表专用线	一端耳机插头、 一端 2 号镀金插头	3	
6	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

实验五 戴维南定理和诺顿定理

一、实验目的

- (1) 加深对戴维南定理和诺顿定理的理解。
- (2) 学习戴维南等效参数的各种测量方法。
- (3) 理解等效置换的概念。
- (4) 学习直流稳压电源、万用表、直流电流表和电压表的正确使用方法。

二、实验原理及说明

(1) 戴维南定理是指一个含独立电源、线性电阻和受控源的一端口，对外电路来说，可以用一个电压源和一个电阻的串联组合来等效置换。此电压源的电压等于该端口的开路电压 U_{oc} ，而电阻等于该端口的全部独立电源置零后的输入电阻，如图 1 所示。这个电压源和电阻的串联组合称为戴维南等效电路。等效电路中的电阻称为戴维南等效电阻 R_{eq} 。

所谓等效是指用戴维南等效电路把有源一端口网络置换后，对有源端口（1—1'）以外的电路的求解是没有任何影响的，也就是说对端口 1—1' 以外的电路而言，电流和电压仍然等于置换前的值。外电路可以是不同的。

(2) 诺顿定理是戴维南定理的对偶形式，它指出一个含独立电源、线性电阻和受控源的一端口，对外电路来说，可以用一个电流源和电导的并联组合来等效置换，电流源的电流等于该一端口的短路电流 I_{sc} ，而电导等于把该一端口的全部独立电源置零后的输入电导 $G_{eq} = \frac{1}{R_{eq}}$ ，见图 1。

(3) 戴维南—诺顿定理的等效电路是对外部特性而言的，也就是说不管是时变的还是定常的，只要含源网络内部除独立的电源外都是线性元件，上述等值电路都是正确的。

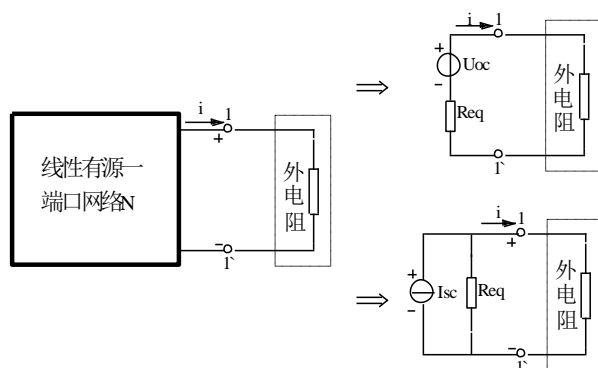


图 1 一端口网络的等效置换

(4) 戴维南等效电路参数的测量方法。开路电压 U_{oc} 的测量比较简单，可以采用电压表直接测量，也可用补偿法测量；而对于戴维南等效电阻 R_{eq} 的取得，可采用如下方法：网络含源时用开路电压、短路电流法，但对于不允许将外部电路直接短路的网络（例如有可能因短路电流过大而损坏网络内部器件时）不能采用此法；网络不含源时，采用伏安法、半流法、半压法、直接测量法等。

三、实验电路及元器件参数

本实验采用电路原理实验箱《戴维南定理和诺顿定理》单元，该电路分为两部分，说明如下：

(1) 端口 1—1' 左为一端口 N 网络。该一端口网络中电源 U_{SN} 由“+”、“-”两个端子接入， $U_{SN}=12V$ ，双刀双投开关 K1 控制网络与网络中电源 U_{SN} 的接通与置零，使网络分别成为有源网络和无源网络，N 网络中电阻参数分别为： $R_1=120\ \Omega/1W$ 、 $R_2=360\ \Omega/2W$ 、 $R_3=240\ \Omega/2W$ 、 $R_4=180\ \Omega/1W$ 。

(2) 端口 2—2' 右侧为外电路，其中有外加电源 U_s 的两个接线端子，可调电位器 R_w 为 $0\sim500\ \Omega$ ，设置电阻 $R_5=R_{eq}$ ，电阻 $R_6=100\ \Omega$ 用来作负载。

(3) 发光管 D1、D2 用来观察电路有无电流，判断电流方向，判断是否接近于等电位（当 D1、D2 都不亮时），但无论测量电流或电压时都要把发光管 D1、D2 短接。

四、实验内容及方法步骤

(一) 计算与测量有源一端口网络的开路电压、短路电流。

(1) 计算有源一端口网络的开路电压 U_{oc} ($U_{I1'}$)、短路电流 I_{sc} ($I_{I1'}$)。根据附表 1 中所示的有源一端口网络电路的已知参数, 进行计算, 结果记入该附表。

(2) 测量有源一端口网络的开路电压 U_{oc} , 可采用以下几种方法:

1) 直接测量法。直接用电压表测量有源一端口网络 1—1' 端口的开路电压, 见图 2 电路, 结果记入附表 2 中。

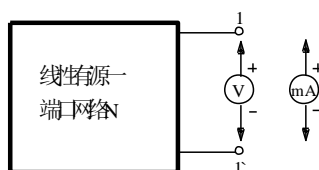


图 2 开路电压、短路电流法

2) 间接测量法。又称补偿法, 实质上是判断两个电位点是否等电位的方法。由于使用仪表和监视的方法不同, 又分为补偿法一、补偿法二、补偿法三。

补偿法一: 用发光管判断等电位的方法, 利用对两个正反连接的发光管的亮与不亮的直接观察, 进行发光管两端是否接近等电位的判断。可自行设计电路。此种方法直观、简单、易行又有趣味, 但不够准确。可与电压表、毫伏表和电流表配合使用。具体操作方法, 留给同学自行考虑选作。

补偿二: 用电压表判断等电位。如图 3 所示, 把有源一端口网络端口的 1' 与外电路的 2' 端连成一个等电位点; U_s 两端外加电压, 起始值小于开路电压 $U_{I1'}$; 短接电位器 R_w 和发光管 D1、D2, 这样可保证外加电压 U_s 正端 2 与有源一端口开路电压正端 1 直接相对, 然后把电压表接到 1、2 两端后, 再进行这两端的电位比较。经过调节外加电源 U_s 的输出电压, 调到 1、2 两端所接电压表指示为零时, 即说明 1 端与 2 端等电位, 再把 1、2 端断开后, 测外加电源 U_s 的电压值, 即等于有源一端口网络的开路电压 U_{oc} , 此值记入附表 2 中。

补偿三：用电流表或检流计判断等电位的方法，条件与方法同上，当调到 1、2 两端所接电压表指示为零时，再换电流表或检流计接到 1、2 两端上，见图 3。微调外加电源 U_s 的电压使电流表或检流计指示为 0（注意一般电源电压调量很小），再断开电流表或检流计后，用电压表去测外加电源 U_s 的电压值，应等于 U_{oc} ，此结果对应记入附表 2。此方法比用电压表找等电位的方法更准确，但为了防止被测两端 1、2 间电位差过大会损坏电流表，所以一定要在电压表指示为零后，再把电流表或检流计换接上。

以上方法中，补偿法一测量结果误差较大，补偿法三测量结果较为精确，但也与电流表灵敏度有关。

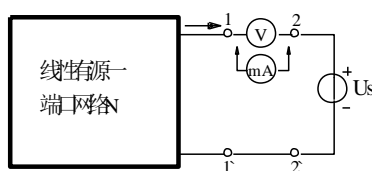


图 3 补偿法二、补偿法三

（二）计算与测量有源一端口网络的等效电阻 R_{eq}

（1）计算有源一端口网络的等效电阻 R_{eq} 。当一端口网络内部无源时（把双刀双投开关 K1 合向短路线），计算有源一端口网络的等效电阻 R_{eq} 。电路参数见附表 1 中，把计算结果记入该附表中。

（2）测量有源一端口网络的等效电阻 R_{eq} 。可根据一端口网络内部是否有源，分别采用如下方法测量：

1）开路电压、短路电流法。当一端口网络内部有源时（把双刀双投开关 K1 合向电源侧），见图所示， $U_{SN}=12V$ 不变，测量有源一端口网络的开路电压和短路电流 I_{sc} 。把电流表接 1—1' 端进行短路电流的测量。测前要根据短路电流的计算选择量程，并注意电流表极性和实际电流方向，测量结果记入附表 3，计算等效电阻 R_{eq} 。

2）伏安法。当一端口网络内部无源时（把双刀双投开关 K1 合向短路线侧），整个一端口网络可看成一个电阻。此电阻值大小可通过在一端口网络的端口外加电压，测电流的方法得出，见图 4。具体操作方法是外加电压接在 U_s 两端，再把 1'、2' 两端相连，把发光管和电位器 R_w 短接，电流表接在 1、2 两端，此时一端口网络等效成一个负载与外加电源 U_s 构成回路。 U_s 电源电压从 0 起调到使电压表指示为 10V 时，电流 I_{S2} 与电压值记入附表 3，并计算一端口网络等效电阻 $R_{eq}=U_s/I_{S2}$ 。

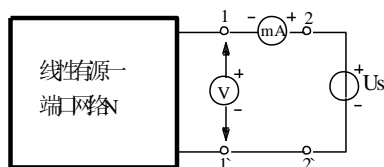


图 4 伏安法

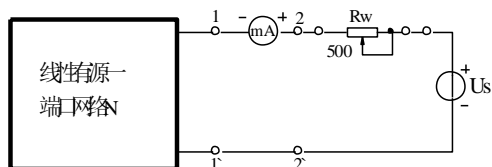


图 5 半流法

3) 半流法。条件同上，只是在上述电路中再串进一个可调电位器 R_w （去掉 R_w 短接线）如图 5 所示，外加电源 U_s 电压 10V 不变。当调 R_w 使电流表指示为伏安法时电流表的指示的一半时，即 $I'_{s2} = I_{s2}/2$ ，此时电位器 R_w 的值等于一端口网络等效电阻 R_{eq} ，断开电流表和外加电源 U_s ，测 R_w 值就等于是 R_{eq} ，结果记入附表 3。

4) 半压法。半压法简单、实用、测试条件同上，见图 6。把 1、2 两端直接相连，外加电源 $U_s = 10V$ ，调 R_w 使 $U_w = (1/2) U_s$ 时，说明 R_w 值即等于一端口网络等效电阻 R_{eq} ，断开外接电源 U_s ，再测量 R_w 的值，结果记入附表 3。

5) 直接测量法。当一端口网络内部无源时，如图 7 所示，可用万用表欧姆档测量或直流电桥直接测量 1—1' 两端电阻 R_{eq} （此种方法只适用于中值、纯电阻电路）、测试结果记入附表 3 中。

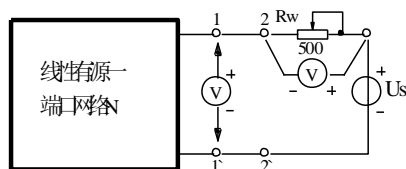


图 6 半压法



图 7 直流测量法

说明：以上各方法测出的值均记入附表 3 中，计算后进行比较，并分析判断结果是否正确。

(3) 验证戴维南定理，理解等效概念

1) 戴维南等效电路外接负载。如图 8 (a) 所示，首先组成一个戴维南等效电路，即

用外电源 U_s （其值调到附表 2 用直接测量法测得的 U_{oc} 值）与戴维南等效电阻 $R_5=R_{eq}$ 相串后，外接 $R_6=100\ \Omega$ 的负载，然后测电阻 R_6 两端电压 U_{R6} 和流过 R_6 的电流值 I_{R6} ，记入附表 4。

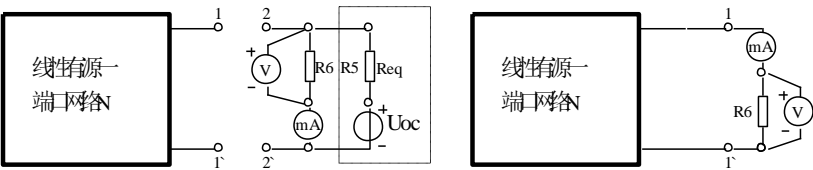


图 8 (a) 戴维南等效电路外接负载 R_6 (b) N 网络端口接负载 R_6

2) N 有源网络 1-1’ 端口外接负载。如图 8 (b) 所示，同样接 $R_6=100\ \Omega$ 的负载，测电压 U_{R6} 与电流 I_{R6} 。结果记入附表 4 中，与 1) 测试结果进行比较，验证戴维南定理。

(4) 验证诺顿定理，理解等效概念

1) 诺顿等效电路外接负载。如图 9 (a) 所示，首先组成一个诺顿等效电路，即用外加电流源 I_s （其值调到附表 3 中开路电压、短路电流法测得的短路电流 I_{sc} 值）与戴维南等效电阻 $R_5=R_{eq}$ 相并后，外接 $R_6=100\ \Omega$ 的负载，然后测电阻 R_6 两端电压 U_{R6} 和流过 R_6 的电流值 I_{R6} ，记入附表 5。采用此方法时注意，由于电流源不能开路，具体操作要在教师具体指导下进行，否则极易损坏电流源。

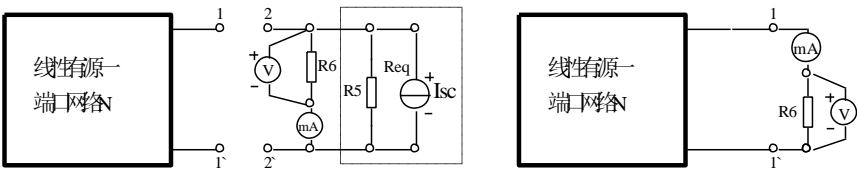


图 9(a) 诺顿等效电路端口接负载 R_6 (b)N 网络的端口接负载 R_6

2) 与上述 (3) 之 2) 中的测试结果进行比较，参阅图 8 (b) ，验证诺顿定理。

五、测试记录表格

自行拟制。

六、实验注意事项

- (1) U_{SN} 是 N 网络内的电源, U_S 是外加电源, 接线时极性位置、电压值不要弄错。
- (2) 此实验是用多种方法进行验证比较, 测量中一定要心中有数。注意各种方法的特点、区别, 绝对不能含糊, 否则无法进行比较, 实验也将失去意义。
- (3) 发光管是用作直接观察电路中有否电流、电流的方向及判断两点是否接近等电位用。但因发光管是非线性元件, 电阻较大, 不管哪种方法, 只要测量电流、电压时就要把它短接掉, 即用短线插到发光管两头插孔既可。
- (4) 测量电流、电压时都要注意各表极性、方向和量程的正确选择。测量时要随时与事先计算的含源一端口网络的等效电阻、开路电压、短路电流等值进行比较, 以保证测量结果的准确。

七、预习及思考题

- (1) 根据附表 1 中的一端口网络的参数, 计算开路电压 U_{oc} , 短路电流 I_{sc} 和等效电阻 R_{eq} , 并将结果记入该附表中。
- (2) 用开路电压、短路电流法测量等效电阻时, 开路电压、短路电流是否可以同时进行测量, 为什么?

八、实验报告要求

- (1) 回答预习与思考中各问题。
- (2) 对几种测量方法获取的测试结果与计算结果进行比较、分析, 说明产生误差的原因。
- (3) 认真填写实验报告中各项内容, 并进行分析。

九、实验用仪器、仪表、设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板		1	
2	稳压源	0~24V, +12V	1	
3	直流电流表	0~30mA	1	
4	直流电压表	0~30V	1	
5	电流表专用线	一端耳机插头、 一端 2 号镀金插头	2	
6	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	N	

实验六 一阶电路动态过程的研究

一、实验目的

- (1) 研究一阶电路的零输入响应，零状态响应及全响应的基本规律和特点。
- (2) 学习一阶电路时间常数 τ 的测量方法。
- (3) 熟悉微分和积分电路结构，加深对构成微分和积分电路必要条件的理解。
- (4) 熟悉示波器的使用方法。

二、实验原理及说明

(1) 含有 L、C 元件的电路称动态电路。描述动态电路的方程是微分方程，由给定的初始条件可求得电路的响应。对线性电路其响应可分为零状态响应、零输入响应及全响应。初始状态为零，仅激励引起的响应叫零状态响应；激励为零，由初始条件引起的响应叫零输入响应；同时同激励和初始条件引起的响应叫全响应。电路中只含有一个电感或电容元件时称为一阶电路。

(2) 一阶电路的零输入响应总是按指数规律衰减，零状态响应总是按指数规律递增或递减，衰减和递增速率的快慢，决定于电路本身参数所确定的时间常数 τ 。在 RC 电路中， $\tau = RC$ ；在 RL 电路中， $\tau = L/R$ 。

(3) 动态电路的过渡过程是短暂的单次变化过程，在瞬间发生又很快消失，所以观察这一过程是有困难的，常用方法是用方波仪记录其过程。在实验室中，根据电路时间常数 τ 的大小不同分别采用不同的实验方法。当 τ 较大时（数秒），一般采用卡秒表的方法，即在“换路”的同时，既观测电压（或电流）的数值，又启动秒表记录时间，从而可以记录下电压（或电流）随时间变化的规律。当 τ 较小时，一般采用示波器观测。为了便于观测，必须使单次过渡过程重复出现。可以用方波的前沿代替单次接通直流电源，这样，在方波的每一个前沿和后沿，都出现一次过渡过程。

(4) 微分电路和积分电路是脉冲数字电路中最常见的波形变换电路。如果输入是方波信号，对于微分电路，当电路时间常数 τ 远远小于方波的脉冲宽度 T_p （20 倍以上）时，电路输出与输入近似呈微分关系，即将方波变换成正负极性的尖脉冲；对于积分电路，如

果电路时间常数 τ 远远大于方波的脉冲宽度 T_p (20 倍以上)，电路输出与输入近似呈积分关系，即将方波变换成三角波。

三、实验电路及元器件参数

实验电路见电路原理实验箱《一阶电路动态过程的研究》单元， $R_1=3K\Omega$ 、 $R_2=5.1K\Omega$ 、 $R_3=5.1K\Omega$ 、 $R_4=2.4K\Omega$ 、 $C_1=10\mu$ 、 $C_2=0.1\mu$ 、 $L_1=100mH$ 、 $L_2=100mH$ 。在这个单元上，可以做 RC 微分、RC 积分、RL 微分、RL 积分。

四、实验内容及方法步骤

(一) 微分电路与积分电路的研究

(1) RC 微分电路如图 1 所示，调节方波仪输出频率，使方波脉冲宽度满足微分电路的必要条件，将 R_2 、 R_4 分别接入，观察微分电路输出有何不同，并将波形画在附表图 2 中。

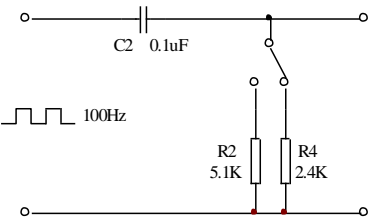


图 1 RC 微分电路（尖脉冲）

(2) RL 微分电路如图 2 所示，调节方波仪输出频率，使方波脉冲宽度满足微分电路的必要条件，将 R_1 、 R_3 分别接入，观察微分电路输出有何不同，并将波形画在附表图 2 中。

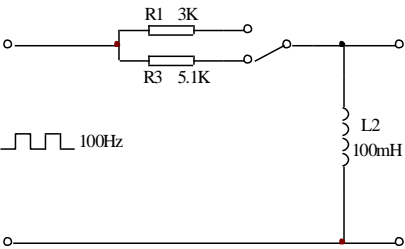


图 2 RL 微分电路（尖脉冲）

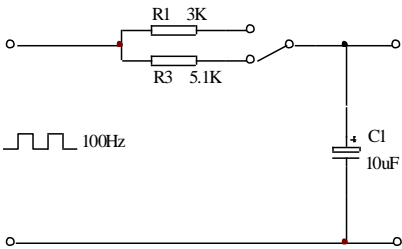


图 3 RC 积分电路

(3) RC 积分电路如图 3 所示，在方波脉冲宽度满足积分电路必要条件下将 R_1 、 R_3 分别接入，观察积分电路输出有何不同，并将波形画在附表图 4 中。

(4) RL 积分电路如图 4 所示，在方波脉冲宽度满足积分电路必要条件下，将 R_2 、 R_4 分别接入，观察积分电路输出有何不同，并将波形画在附表 5 中。

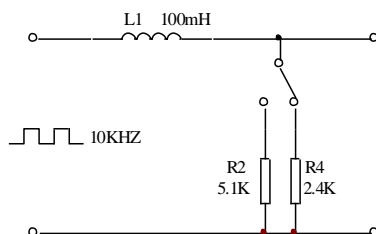


图 4 RL 积分电路（三角波）

五、测试记录表格

自行拟制。

六、实验注意事项

- (1) 电路左端为输入端，加方波信号，右端为输出端，接示波器，不要弄错。
- (2) 用示波器观察波形，一定要将输入信号选择开关置于“AC”位置，随被测信号幅值不同，改变幅值开关的位置，使波形清晰可测。

七、预习及思考题

- (1) 微分电路如图 5 所示， $R=5.1K\Omega$ ， $C_1=0.1\mu F$ ，试问对方波脉宽有什么要求？

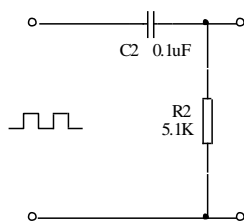


图 5 RC 微分电路

八、实验报告要求

(1) 分别画出微分电路、积分电路输出波形，并指出随电阻 R 值的不同，波形有何变化？

九、实验用仪器、仪表、设备

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板	一阶电路动态过程的研究	1	
2	示波器		1	
3	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

实验七 二阶电路动态过程的研究

一、实验目的

- (1) 研究二阶电路动态过程的零状态响应和零输入响应的基本规律和特点。
- (2) 分析电路参数 R、L、C 对二阶电路动态过程响应的影响。
- (3) 学习使用双线示波器观察动态过程波形的方波。
- (4) 学习方波信号源的使用方法。

二、实验原理及说明

(1) 二阶线性电路。从电路原理我们知道，用二阶线性常微分方程来描述的电路称为二阶线性电路。本实验研究有一个电感和电阻，又有一个电容的二阶电路，在方波激励时响应的动态过程。

对于 RLC 串联的二阶电路，无论是零状态响应，还是零输入响应，电路过渡过程中性质完全由特征方程上 $LCp^2 + RCp + 1 = 0$ 的特征根 $p_{1,2}$ 来决定。

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$$

从上式可看出，特征根 $p_{1,2}$ 实际由电路 R、L、C 三个元件参数的数值大小来决定。

1) 如果 $R > 2\sqrt{L/C}$ ，电路动态过程的性质为过阻尼的非振荡的过程。

2) 如果 $R = 2\sqrt{L/C}$ ，电路动态过程的性质为临界阻尼过程。

3) 如果 $R < 2\sqrt{L/C}$ ，电路动态过程的性质为欠阻尼的衰减振荡，衰减系数 $\delta = R/2L$ 。在一般情况下， δ 是一个正实数。

4) 如果 $R = 0$ ，电路动态过程为等幅振荡，振荡固有角频率 $\omega_0 = 1/\sqrt{L/C}$ ，频率 $f_0 = 1/2\pi \sqrt{L/C}$ ，从电路理论可知，等幅振荡是按正弦方式随时间变化的。

5) 如果 $R < 0$, 电路中的阻尼为负值, 电路动态过程为增幅振荡。等幅与增幅振荡只有加入负阻抗变换器后才可实现。

从上述可知, 通过改变电路的参数电阻 R (含负阻)、电感 L 或电容 C 的值, 均可使电路发生上述几种不同性质的过渡过程。为研究二阶电路动态过程的性质, 实际单元板上电路参数 R 、 L 、 C 各给出 2~3 个值。

(2) 动态过程性质的观察、测量与激励源频率(周期)的选择。动态过程很快, 只能用示波器进行观察。用示波器观察必须使动态过程周期地重复出现。为了达此目的, 本实验激励采用频率(15Hz~1.5kHz)可调的方波信号源。它对电路的作用可以这样来理解, 在方波电压大于 0 的正半个周期, 输入电压由零跳变为 u_0 , 使电路突然与一个直流电压 u_0 接通, 相当于电路的零状态响应; 方波后半半个周期, 输入电压又由 u_0 跳变为 0, 使电路输入端突然短路, 相当于电路的零输入响应。通过调方波电源频率而改变方波电压的周期使其半周期的时间远远大于过渡过程持续时间时(一般可选方波信号源的半周期和电路谐振时的周期保持 5:1 左右), 就可由示波器观察到动态过程的全过程(包括零输入响应和零状态响应)。

(3) 实验方法说明。观察动态过程可采用电感、电容参数一定时调电阻的方法, 也可采用电阻一定调电感、电容的方法。用示波器观察时, 采用电源频率不变, 电感、电容不变, 只调电阻; 或者采用电感、电容和电阻一定, 调电源频率的方法。但无论如何调, 心中要有数, 不然调来调去什么现象都观察不到。

三、实验电路及元器件参数

本实验采用电路原理实验箱《二阶电路动态过程的研究》单元。面板电路中“+”、“-”两端接线端子接频率可调的方波信号源(10Hz~1KHz, 0~10V)。

电路中元器件参数: 电容 $C_1=0.1\mu\text{F}$, $C_2=0.22\mu\text{F}$, $C_3=0.047\mu\text{F}$, 电感 $L_1=5\text{mH}$, $L_2=10\text{mH}$, 可调电阻 $R_w=0\sim 1\text{K}\Omega$, $R_2=10\Omega$ 。

四、实验内容及方法步骤

(1) 测试准备

测试前先把示波器、方波信号源的电源接通, 选出 R 、 L 、 C 元件组成二阶电路, 再用示波器观察方波信号源输出电压波形, 正常后, 再进行以下内容。

(2) RLC 电路动态过程的测试与观察

根据已知的电路参数和电路是否加负阻元件, 可分别组成以下几种不同的电路进行观察与测试。

1) 当电路不加负阻元件时各种波形的观察与测量。在图 1 所示电路“+、-”两个接线端子上分别接方波电源的“+”和“-”两端, 把方波源输出电压调到 5V, 示波器

输入电缆接到待观察元件的两端，通过调节可调电阻 R_w 阻值的变化，实现 R 与 $2\sqrt{L/C}$ 的关系变化，观察以下三种情况的 U_L 、 U_C 和 U_R 的波形和量值，结果记入附表 1 中。

观察当 $R < 2\sqrt{L/C}$ 时，电路欠阻尼时的动态过程（衰减振荡）。

观察当 $R > 2\sqrt{L/C}$ 时，电路过阻尼时的动态过程（不振荡）。

观察当 $R = 2\sqrt{L/C}$ 时，电路临界振荡时的动态过程。

2) 重新选择一组电路参数，再重复上述（1）、（2）实验内容，将测试结果分别记入附表 2 及附表 3 中。

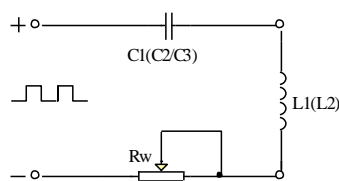


图 1 RLC 串联电路

（3）说明

1) 记录各动态过程波形要与电源波形对应记录。

2) 测量动态过程不同状态下的方波信号源电压频率。

3) 测量 R 、 L 、 C 各实际参数并记录于附表中，以便把实际测量值与计算值进行比较，也便于分析研究和验证电路产生非振荡和振荡等各种动态过程的条件。

五、测试记录表格

见附表。

六、实验注意事项

（1）注意方波发生器和示波器的正确使用方法，不要无目的地来回调、扳旋钮和按键。

（2） R 、 L 、 C 任一参数变化都会使电路动态过程性质发生变化，测试前应先计算出 R 与 L 、 C 之间的关系，有目的地进行各种变化和调试。

(3) 实验过程电源电压要保持一个固定数值，频率改变后要把波形调稳，保证动态过程各波形能观察清楚。要有规律地进行示波器波形的细调、轻调，与示波器扫描时间相配合，调到波形没有重叠线和滚动现象时，方可进行波形记录。

(4) 用双踪示波器观察波形要注意“共”地，也就是示波器两条输入电缆地端要接在同一处。为了便于用双踪示波器观察波形，单元中“+”、“-”端子可以交换使用，即“+”端可接电源“-”端，“-”端也可接电源“+”端。

七、预习及思考题

(1) 复习二阶电路的零输入响应，零状态响应等基本概念。

(2) 二阶电路为什么会出现振荡，试说明振荡条件和振荡固有频率。

(3) 为什么激励源采用方波源，而不直接采用直流电源手动开关不断进行合、断，合、断的切换方法？在本实验中方波源与直流电压有什么内在联系？

八、实验报告要求

(1) 画出动态过程各种状态下，包括零输入响应、零状态响应的 U_L 、 U_C 和 U_R 的波形和 i 随时间变化的曲线。

(2) 认真填写实验报告中的各项内容。

九、实验用仪器、仪表、设备

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板	二阶电路动态过程的研究	1	自行开发研制
2	双踪示波器		1	
3	信号源	10HZ~10KHZ	1	
6	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

实验八 R、L、C 元件阻抗特性的研究

一、实验目的

1. 验证电阻、感抗、容抗与频率的关系，测定 $R \sim f$ 、 $X_L \sim f$ 及 $X_C \sim f$ 特性曲线。
2. 加深理解 R、L、C 元件端电压与电流间的相位关系。

二、原理说明

1、在正弦交变信号作用下，R、L、C 电路元件在电路中的抗流作用与信号的频率有关，它们的阻抗频率特性 $R \sim f$ ， $X_L \sim f$ ， $X_C \sim f$ 曲线如图 1 所示。

2、单一参数 R、L、C 阻抗频率特性的测量电路如图 2 所示。 $R=1K\Omega$ ， $r=200\Omega$ ， $C=1\mu F$ ， $L=10mH$ 等取自《二阶电路动态过程的研究》单元中的部分元件。

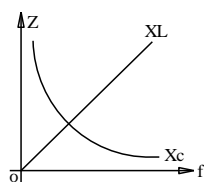


图 1

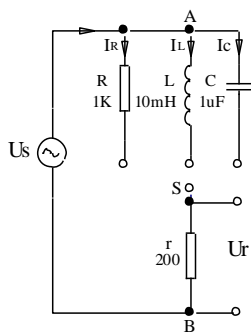


图 2

图中 R、L、C 为被测元件，r 为电流取样电阻。改变信号源频率，测量 R、L、C 元件两端电压 U_R 、 U_L 、 U_C ，流过被测元件的电流则可由 r 两端电压除以 r 得到。

3、元件的阻抗角（即相位差 ϕ ）随输入信号的频率变化

而改变，将各个不同频率下的相位差画在以频率 f 为横坐标、阻抗角 ϕ 为纵坐标的坐标纸上，并用光滑的曲线连接这些点，即得到阻抗角的频率特性曲线。

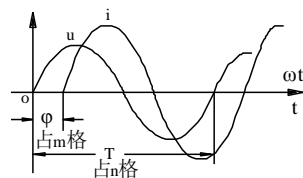


图 3

用双踪示波器测量阻抗角的方法如图 3 所示。从荧光屏上数得一个周期占 n 格，相位差占 m 格，则实际的相位差 ϕ

（阻抗角）为

$$\phi = m \times \frac{360^\circ}{n}$$

四、实验内容

1、测量 R、L、C 元件的阻抗频率特性

通过电缆线将函数信号发生器输出的正弦信号接至如图 2 电路，作为激励源 u ，并用交流毫伏表测量，使激励电压的有效值为 $U=3V$ ，并在实验过程中保持不变。

使信号源的输出频率从 200Hz 逐渐增至 5KHz 左右，并使端点 S 分别接通 R、L、C 三个元件，用交流毫伏表分别测量 U_R 、 U_L 、 U_C ，并通过计算得到各频率点时的 R 、 X_L 与 X_C 之值，记入附表中。

注意：在接通 C 测试时，信号源的频率应控制在 200~2500Hz 之间。

2、用双踪示波器观察 RL 串联和 RC 串联电路在不同频率下阻抗角的变化情况，按图 3 记录 n 和 m ，算出 ϕ ，自拟表格记录之。

五、实验注意事项

1、建议采用浮地式交流毫伏表。

2、测 ϕ 时，示波器的“V/div”和“t/div”的微调旋钮应旋置“校准位置”。

六、预习思考题

1、图 2 中各元件流过的电流如何求得？

2、怎样用双踪示波器观察 RL 串联和 RC 串联电路阻抗角的频率特性？

七、实验报告

1、根据实验数据，绘制 R、L、C 三个元件阻抗频率特性曲线，可得出什么结论？

2、根据实验数据，绘制 RL、RC 串联电路的阻抗角频率特性曲线，并总结、归纳出结论。

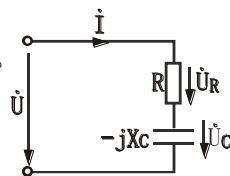
八、实验用仪器、仪表、设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板		1	自行开发研制
2	函数信号发生器		1	
3	交流毫伏表		1	
4	直流电压表或万用表	0~30V	1	
5	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

实验九 正弦稳态交流电路相量的研究

一、实验目的

1. 研究正弦稳态交流电路中电压、电流相量之间的关系。
2. 掌握日光灯线路的接线。
3. 理解改善电路功率因数的意义并掌握其方法。

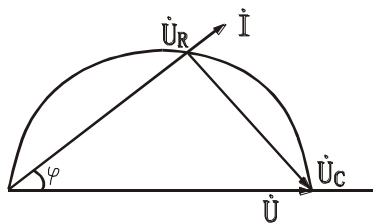


二、原理说明

1. 在单相正弦交流电路中，用交流电流表测得各支路的电流值，用交流电压表测得回路各元件两端的电压值，它们之间的关系满足相量形式的基尔霍夫定律，即 $\sum \dot{I} = 0$ 和 $\sum \dot{U} = 0$ 。

图 1

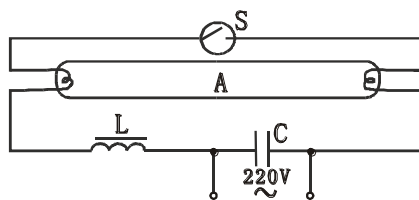
2. 图 1 所示的 RC 串联电路，在正弦稳态信号 \dot{U} 的激励下， \dot{U}_R 与 \dot{U}_C 保持有 90° 的相位差，即当 R 阻值改变时， \dot{U}_R 的相量轨迹是一个半圆。



\dot{U} 、 \dot{U}_C 与 \dot{U}_R 三者形成一个直角形的电压三角形，如图 2 所示。R 值改变时，可改变 ϕ 角的大小，从而达到移相的目的。

图 2

3. 日光灯线路如图 3 所示，图中 A 是日光灯管，L 是镇流器，S 是启辉器，C 是补偿电容器，用以改善电路的功率



因数 ($\cos \phi$ 值)。有关日光灯的工作原理请自行翻阅有关资料。

图 3

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
2	交流电压表	0~450V	1	
3	交流电流表	0 ~500mA	1	
4	单相功率表		1	自备
5	镇流器、启辉器	与 10W 灯管配用	各 1	
6	日光灯灯管	10W	1	
7	电容器	1 μ F, 2.2 μ F/500V	各 2	
8	白炽灯	220V, 15W	1~3	

四、实验内容

1. 按图 2-1 接线。R 为 220V、15W 的白炽灯泡，电容器为 2.2 μ F/450V。
经指导教师检查后，接通实验平台电源，接入 220V。记录 U、 U_R 、 U_C 值，验证电压三角形关系。

测 量 值			计 算 值	
U (V)	U_R (V)	U_C (V)	U' (V)	φ

2. 日光灯线路接线与测量。

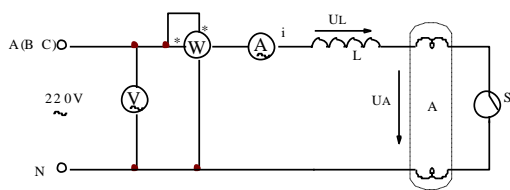


图 4

按图 4 接线。经指导教师检查后接通实验平台电源，启辉器工作到日光灯启辉点亮，记下三表的指示值。然后将电压调至 220V，测量功率 P ，电流 I ，电压 U ， U_L ， U_A 等值，验证电压、电流相量关系。

	$P(W)$	$\cos \phi$	$I(A)$	$U(V)$	$U_L(V)$	$U_A(V)$
启辉值						
正常工作值						

3. 并联电路——电路功率因数的改善。

按图 5 组成实验线路。经指导教师检查后，接通实验平台电源，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，进行三次重复测量并记录。

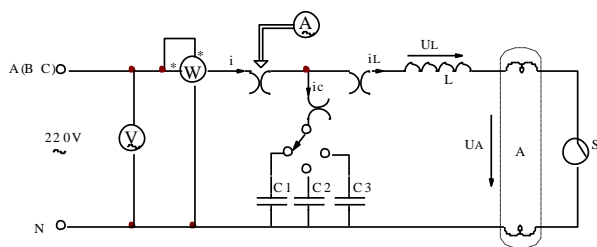


图 5

电容值	测 量 数 值						计 算 值	
(μF)	P(W)	$\cos \phi$	U(V)	I (A)	I_L (A)	I_C (A)	I' (A)	$\cos \phi$
0								
1								
2.2								
2.2+2.2								

五、实验注意事项

1. 本实验用交流市电 220V，务必注意用电和人身安全。
2. 功率表要正确接入电路。
3. 线路接线正确，日光灯不能启辉时，应检查启辉器及其接触是否良好。

六、预习思考题

1. 参阅课外资料，了解日光灯的启辉原理。
2. 在日常生活中，当日光灯上缺少了启辉器时，人们常用一根导线将启辉器的两端短接一下，然后迅速断开，使日光灯点亮；或用一只启辉器去点亮多只同类型的日光灯，这是为什么？
3. 为了改善电路的功率因数，常在感性负载上并联电容器，此时增加了一条电流支路，试问电路的总电流是增大还是减小，此时感性元件上的电流和功率是否改变？
4. 提高线路功率因数为什么只采用并联电容器法，而不用串联法？所并的电容器是否越大越好？

七、实验报告

1. 完成数据表格中的计算，进行必要的误差分析。
2. 根据实验数据，分别绘出电压、电流相量图，验证相量形式的基尔霍夫定律。

3. 讨论改善电路功率因数的意义和方法。
4. 装接日光灯线路的心得体会及其他。

实验十 三相交流电路电压、电流的测量

一、实验目的

1. 掌握三相负载作星形联接、三角形联接的方法，验证这两种接法下线、相电压及线、相电流之间的关系。
2. 充分理解三相四线供电系统中中线的作用。

二、原理说明

1. 三相负载可接成星形（又称“Y”接）或三角形（又称“△”接）。当三相对称负载作Y形联接时，线电压 U_1 是相电压 U_p 的 $\sqrt{3}$ 倍。线电流 I_1 等于相电流 I_p ，即

$$U_1 = \sqrt{3} U_p \quad I_1 = I_p$$

在这种情况下，流过中线的电流 $I_0=0$ ，所以可以省去中线。

当对称三相负载作△形联接时，有

$$I_1 = \sqrt{3} I_p \quad U_1 = U_p$$

2. 不对称三相负载作Y联接时，必须采用三相四线制接法，即 Y_0 接法。而且中线必须牢固联接，以保证三相不对称负载的每相电压维持对称不变。

倘若中线断开，会导致三相负载电压的不对称，致使负载轻的那一相的相电压过高，使负载遭受损坏；负载重的一相相电压又过低，使负载不能正常工作。尤其是对于三相照明负载，无条件地一律采用 Y_0 接法。

3. 当不对称负载作△接时， $I_1 \neq \sqrt{3} I_p$ ，但只要电源的线电压 U_1 对称，加在三相负载上的电压仍是对称的，对各相负载工作没有影响。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流调压器	0~450V	1	自备
2	交流电压表	0~450V	1	
3	交流电流表	0~500mA	1	
4	三相灯组负载	220V, 15W 白炽灯	9	

四、实验内容

1. 三相负载星形联接（三相四线制供电）

按图 1 线路组接实验电路。即三相灯组负载经三相自耦调压器接通三相对称电源。将三相调压器的旋柄置于输出为 0V 的位置（即逆时针旋到底）。经指导教师检查后，方可开启实验平台三相电源开关，然后调节调压器的输出，使输出的三相线电压为 220V，并按数据表格要求的内容完成各项实验，将所测得的数据记入表中，并观察各相灯组亮暗的变化程度，特别要注意观察中线的作用。

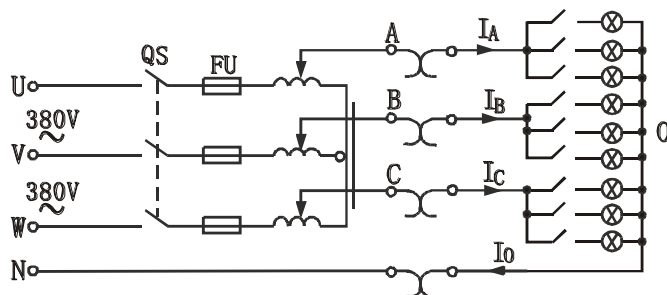


图 1

测量数据 负载情况	开灯盏数			线电流 (A)			线电压 (V)			相电压 (V)			中线 电流 I_0 (A)	中点 电压 U_{N0} (V)
	A 相	B 相	C 相	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{A0}	U_{B0}	U_{C0}		
Y_0 接对称负载	3	3	3											
Y 接对称负载	3	3	3											
Y_0 接不对称负载	1	2	3											
Y 接不对称负载	1	2	3											
Y_0 接 B 相断开	1	断	3											
Y 接 B 相断开	1	断	3											
Y 接 B 相短路	1	短	3											

2. 负载三角形联接（三相三线制供电）

按图 2 改接线路，经指导教师检查合格后接通三相电源，并调节调压器，使其输出电压为 220V，并按数据表格要求进行测试。

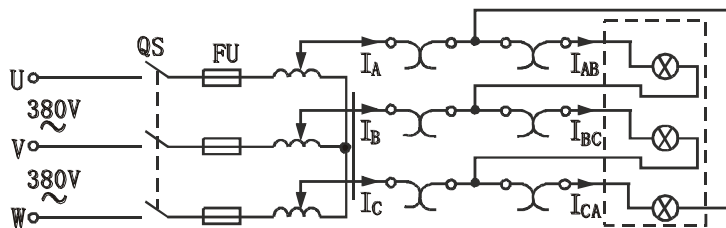


图 2

测量 数据 负载 情况	开 灯 盏 数			线电压=相电压 (V)			线电流 (A)			相电流 (A)		
	A-B 相	B-C 相	C-A 相	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
三相对称	3	3	3									
三相不对称	1	2	3									

五、实验注意事项

1. 本实验采用三相交流市电，线电压为 380V，应穿绝缘鞋进实验室。实验时要注意人身安全，不可触及导电部件，防止意外事故发生。
2. 每次接线完毕，同组同学应自查一遍，然后由指导教师检查后，方可接通电源，必须严格遵守先断电、再接线、后通电；先断电、后拆线的实验操作原则。
3. 星形负载作短路实验时，必须首先断开中线，以免发生短路事故。

六、预习思考题

1. 三相负载根据什么条件作星形或三角形连接？
2. 复习三相交流电路有关内容，试分析三相星形联接不对称负载在无中线情况下，当某相负载开路或短路时会出现什么情况？如果接上中线，情况又如何？
3. 本次实验中为什么要通过三相调压器将 380V 的市电线电压降为 220V 的线电压使用？

七、实验报告

1. 用实验测得的数据验证对称三相电路中的 $\sqrt{3}$ 关系。
2. 用实验数据和观察到的现象，总结三相四线供电系统中中线的作用。
3. 不对称三角形联接的负载，能否正常工作？实验是否能证明这一点？
4. 根据不对称负载三角形联接时的相电流值作相量图，并求出线电流值，然后与实验测得的线电流作比较，分析之。

实验十一 R、L、C 串、并联谐振电路

一、实验目的

- (1) 加深对 R、L、C 串、并联电路谐振特性的理解。
- (2) 学习测定 R、L、C 串、并联电路谐振特性的方法。
- (3) 熟悉音频信号发生器和晶体管毫伏表的使用方法。

二、实验原理及说明

谐振现象是正弦稳态电流电路的一种特定的工作状况，在无线电和电工技术中得到广泛的应用；另一方面，发生谐振时又有可能破坏系统的正常工作，所以，对谐振现象进行深入的研究有其重要的意义。

通过实验，搞清 R、L、C 电路在什么条件下出现谐振现象，如何测量和判断谐振特性。

(一) R、L、C 串联电路

(1) R、L、C 串联电路的谐振条件：

1) 总电流和总电压同相。从电路原理已知 R、L、C 串联电路的等效复阻抗 $Z=R+j(\omega L-1/\omega C)$ 。当 $\omega L>1/\omega C$ 时，电路呈感性；当 $\omega L<1/\omega C$ 时，电路呈容性；而当 $\omega L=1/\omega C$ 时，RLC 串联电路呈阻性，总电流和总电压同相，这种状态称为谐振。RLC 串联电路发生的谐振称为串联谐振。

2) 电路电抗 $X=\omega L-1/\omega C=0$ 。此式可写成 $\omega_0 L=1/\omega_0 C$ 即 $\omega_0=1/\sqrt{LC}$

3) 谐振频率 $f_0=1/2\pi\sqrt{LC}$ 从该式可得出如下结论：

①电路谐振频率只和电路参数 L、C 值有关，而与电阻无关。

②电路参数 L、C 和电源频率 f 三个量中，无论改变那一个量都可能使电路发生谐振，又可能使电路避免谐振。

③当电路参数 L、C 值已固定时，改变电源频率可使电路发生谐振。

(2) RLC 串联电路谐振的特征：

1) 电路总阻抗达最小值，即 $Z=R$ ，此时虽然电路电抗 $X=0$ ，但 $X_L=X_C=\omega_0 L=1/\omega_0 C\neq 0$ 。 $\omega_0 L$ 或 $1/\omega_0 C$ 称为特性阻抗。

2) 电阻上电压 $\dot{U}_R=R\dot{I}=\dot{U}_S$ ，等于电源电压。

3) 电流达最大值 $\dot{I}_{\max} = \dot{U}_s / R$, 且与电压同相。

4) 电抗电压 \dot{U}_x 于零, 即 $\dot{U}_x = \dot{U}_L + \dot{U}_C = jX\dot{I} = 0$, 但电感两端电压 \dot{U}_L 和电容端电压 \dot{U}_C 不等于零。

5) 电感两端电压 \dot{U}_L 和电容两端电压 \dot{U}_C 是外施电压的 Q 倍, 它们大小相等, 即有效值 $U_L = U_C = QU_s$ 。 \dot{U}_L 与 \dot{U}_C 方向相反。

6) 电路品质因数 $Q = \omega_0 L / R$ 是特性阻抗与电阻之比。如果 $Q \gg 1$, 则谐振时, 电感和电容上会出现超出外施电压 Q 倍的高电压, U_L 和 U_C 比电源电压 U_s 大得多, 这是串联电路谐振的一个非常重要的特征; 它既有用又有害。

7) 电路呈电阻性, 电路吸收的无功功率为零, 即无功功率 $Q = I^2 X = I^2 (X_L - X_C) = Q_L - Q_C = 0$ 。此式表明, 电源和电路之间不存在能量和交换, 但电感元件与电容元件间存在能量交换。

(3) 判断电路是否串联谐振的方法: 采用固定参数后, 改变电源的频率, 测量元器件上的压降的方法。根据串联谐振特征, 如测出电阻两端电压 U_R 最大 (理论上应等于电源电压, 实际上不等), 电感两端电压 U_L 与电容两端电压 U_C 是电源电压的 Q 倍, 或 $U_x = 0$, 即可判断发生串联谐振。

串联谐振适用于信号源内阻较小的情况。

(二) R、L、C 并联电路

(1) R、L、C 并联电路的谐振条件:

1) 总电流和总电压同相。从电路原理已知 RLC 并联电路, 等效复导纳 $Y = G - j(B_L - B_C) = G - jB = (1/R) - j[(1/\omega L) - \omega C]$ 。当 $B > 0$ (即 $1/\omega L > \omega C$) 时, 电路呈感性; 当 $B < 0$ (即 $1/\omega L < \omega C$) 时, 电路呈容性; 而当 $B = 0$, 即 $1/\omega L = \omega C$ 时, 电路呈阻性, 即总电流和电压同相, 电路的这种状态称为谐振。RLC 并联电路发生的谐振称为并联谐振。

2) 电路电纳 $B = (1/\omega L) - \omega C = 0$, 此式可写成 $1/\omega L = \omega C$, 即 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ 。

3) 谐振频率 $f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC}$ 。从上式可得出如下结论:

① 电路谐振频率只和电路参数 L 、 C 值有关, 而与电阻无关。

② 电路参数 L 、 C 和电源频率 f 三个量中, 无论改变哪一个量都可能使电路发生谐振, 又可能使电路避免谐振。

③当电路参数 L 、 C 值已固定时，改变电源频率可使电路发生谐振。

(2) 谐振的特征：

1) 电路总阻抗达最大值 $Z=1/Y=R$ ，导纳为最小 $Y=1/R$ ，此时虽然电路电抗 $X=0$ ，但 $X_L=X_C=\omega_0 L=1/\omega_0 C \neq 0$ 。

2) 当电源电压 U 一定时，总电流 $I=YU=U/R$ 达最小值。

3) 谐振时，虽然电纳 $B=B_L-B_C=0$ ，但 $B_L=B_C=1/\omega_0 L=\omega_0 C \neq 0$ 。并联谐振时的感抗或容抗称为并联谐振电路的特性阻抗，用符号 ρ 表示， $\rho=\omega_0 L=1/\omega_0 C=\sqrt{L/C}$ 。

4) 电纳的总电流 \dot{I}_B 为零，即 $\dot{I}_B=\dot{I}_L+\dot{I}_C=0$ 。但 \dot{I}_L 与 \dot{I}_C 不等于零。谐振时电感支路电流 I_L 和电容支路电流 I_C 是总电流的 Q 倍，即 $I_C=I_L=QI$ 。当 Q 很大时 $I_C=I_L \gg I$ ，故并联谐振又称电流谐振。

5) 由于并联谐振时，电路呈电阻性，电路吸收的无功功率为零，即 $Q=BU^2=Q_L-Q_C=0$ ，电源和电路间无能量的交换，但电感元件与电容元件间有能量交换。

(3) 判断电路是否并联谐振的方法。同样采取固定参数后，改变电源的频率，测量元器件上的压降。根据并联谐振特征，如测出串在电路中的电阻两端的电压 U_R 最小，并联电路两端电压 U_L 等于 U_C ，并且与串联电阻 U_R 两端电压相加应等于电源电压，或者测电感支路电流 I_L 和电容支路电流 I_C 应等于电路电流的 Q ，即可判断发生并联谐振。但是由于电源频率较高，一般电流表无法进行测量，本实验只能用晶体管电压表测电压的方法进行判断。

三、实验电路及元器件参数

本实验采用电路原理实验箱《R、L、C 串并联谐振电路》单元。其中：电阻 $R_1=100\ \Omega$ ， $R_2=100\ \Omega$ ；电容 $C_1=0.1\ \mu F$ ， $C_2=0.22\ \mu F$ ；电感 $L_1=5\text{mH}$ ， $L_2=10\text{mH}$ ；电位器 $R_w=0\sim 1\text{K}\ \Omega$ ；根据以上参数可任意组成串、并联谐振电路。

四、实验内容及方法步骤

(一) R、L、C 串联电路（电路自拟）

串联电路的电阻可取 $100\ \Omega$ 、 $200\ \Omega$ 或由电位器 $R_w=0\sim 1\text{K}\ \Omega$ 调节产生，测试内容如下：

(1) 谐振特性的测量。首先根据自拟电路参数，计算出谐振频率 f_0 和品质因数 Q 值记入附表 1、附表 2、附表 3，参考电路如图 1 所示。在调频过程中，要始终保持电源电压不变（见下述六实验注意事项（1）），测量电路谐振时对应频率 f_0 及各量记入附表 1、附表 2 或附表 3。

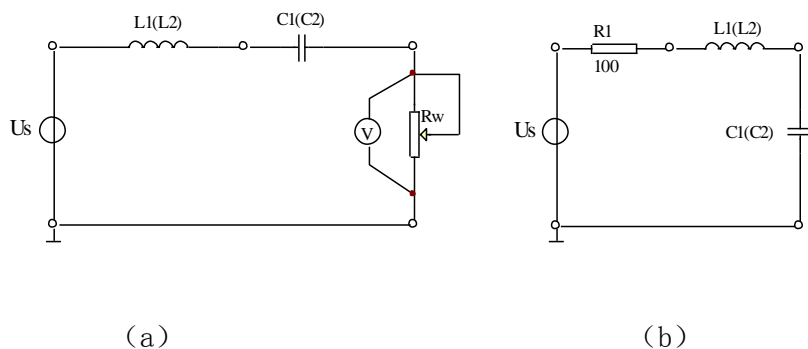


图1 R、L、C 串联谐振电路

(2) 测量对应 $0.7U_{R0}$ (U_{R0} 为谐振时电阻 R_i 或 R_w 两端电压) 幅值时的频率及各量, 记入附表 1、附表 2 或附表 3。

(3) 分别测量对应 $0.5U_{R0}$ 幅值时的频率及各量, 记入附表 1、附表 2 或附表 3。

(4) 分别测量对应 $0.3U_{R0}$ 幅值时的频率及各量, 记入附表 1、附表 2 或附表 3。

(5) 分别测量当 U_L 和 U_C 最大值时的对应频率及各量, 记入附表 1、附表 2 或附表 3。

(6) 计算表中各量。

(7) 说明:

1) 为了便于观察测量与分析 RLC 串联电路, 电路参数 LC 与电路谐振频率 f_0 的关系以及电路品质因数 Q 与最大谐振电压 U_{L0} (U_{C0}) 的关系, R、L、C 串联电路实验测试记录表格给出两组: 一组是附表 1、附表 2, 可用于电路的 L、C 参数不同, 而电阻相同时的测量记录; 而附表 2 和附表 3 可用于电路的 L、C 参数相同, 而电阻不同时的测量记录。

2) R、L、C 串联电路串联电阻 R 的选择, 如果是选 $50\ \Omega$ 或 $200\ \Omega$, 可采用可调电位器 R_w 的阻值, 用万用表事先测出, 电阻 R_1 跳过, 见图 1 (a), 使 R、L、C 电路电阻是 $50\ \Omega$ 或 $200\ \Omega$; 如果是选 $100\ \Omega$ 电阻, 那就用电阻 $R_i=100\ \Omega$, 见图 1 (b)。

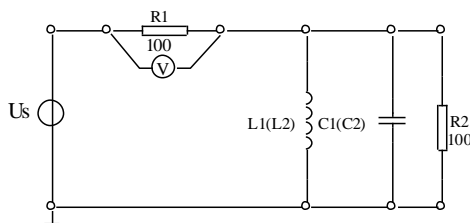
(二) R、L、C 并联电路

首先根据自拟电路参数, 计算出谐振频率 f_0 和品质因数 Q 值, 但需说明的是电路参数不论如何选择, 电路不论如何设计、其电源和 RLC 并联部分之间一定要串一个电阻, 如图 2.13-2 所示的 R_i 电阻, 否则其并联电路的谐振现象根本看起来不出来。这个 R_i 电阻可看成是作取样电阻或限流电阻或电源内阻等多种用途, 而且阻值要比较大。

(1) 测量 RLC 并联电路参数。

- 1) 谐振时对应测量图 2 所示电路的谐振频率 f_0 及各量，记入附表 4、附表 5。
- 2) 测量对应 $0.7U_{C0}$ (U_{L0}) 幅值时的频率及各量，记入附表 4、附表 5。
- 3) 分别测量对应 $0.5 U_{C0}$ (U_{L0}) 幅值时的频率及各量，记入附表 4、附表 5。
- 4) 分别测量对应 $0.3U_{C0}$ (U_{L0}) 幅值时的频率及各量，记入附表 4、附表 5。
- 5) 计算表中各量。
- 6) 说明：

①附表 4、附表 5 用于 R、L、C 并联电路，L、C 取值不同时的谐振频率 f_0 是否相同的比较。为了比较方便，可采用保持 L 值不变，只改变 C 值的方法，也可以采用保持 C 值不变，只改变 L 值的方法进行。



②对于判断图 2 所示电路是否谐振，应该测量 图 2 RLC 并联电路

什么位置的什么量？由于电路的 R_1 等于 R_2 ，当电路谐振时， U_{R1} 和 U_{R2} 应是什么关系，一定要在明了清楚的前提下进行。

五、测试记录表格

见附表

六、实验注意事项

- (1) 实验调试过程要始终保持信号源输出幅度 3V 不变，尤其改变频率时更需注意。
- (2) 电压表或毫伏表量程要选择合适的，测量前必须先把测试笔短接调零。
- (3) 为了加快调测速度、节奏，做到调测时心中有数，要根据电路参数计算出电路的固有谐振频率 f_0 、电路品质因数 Q 值。这样不仅便于选择频率范围、量程，又可随时判断测量结果是否正确，不然只能事倍功半，或测试结果根本无意义。
- (4) 测电路谐振时的电感电压 U_{L0} 与电容电压 U_{C0} 时，表笔“—”端应接 L、C 元件之间，并且一定要根据电路 Q 值大小（Q 值越大、 $U_L=U_C=QU_s$ 电压越高）情况换用大的量程或合适量程。
- (5) 本实验内容较多，每次实验可由指导教师根据学生的专业和具体情况进行取舍，或根据需要分 2~3 次完成。

七、预习及思考题

- (1) 实验前要预习 R、L、C 的串、并联电路出现谐振的条件、特征和如何进行判断的方法。

(2) 理论上 R 、 L 、 C 串联电路谐振时，电阻上电压 $U_R = U_S$ ，而电容、电感上的电压有效值 $U_C = U_L = QU_S$ ，它们与实测结果有否区别？分析原因何在。

(3) 并联谐振时， L 支路与 C 支路的电流有效值 $I_L = I_C = QI$ （总电流），如何根据实测电压值计算 I_L 、 I_C 值，并与理论值进行比较有否区别，并分析原因。

(4) 对于图 2 所示电路，如果处在谐振状态，这个并联电路的电压 U_L （或 U_C ）电压是否相等？理想状态下这个并联电路的电压 U_L （或 U_C ）电压是多少？最好是先分析出结果，再进行测量，并进行分析。

(5) 举例说明谐振现象的应用和危害。

八、实验报告要求

(1) 回答预习与思考中各问题。

(2) 举例分析电压谐振和电流谐振各在什么情况下产生，当 R 、 L 、 C 串联电路 L 、 C 值一定时，你调哪个参数能使 U_C 和 U_L 值越来越大，大于电源电压或是电源电压的 Q 倍或越来越小，理论计算与测量值是否存在差别。

(3) 画出 R 、 L 、 C 串联电路工作在 $f_3 < f_0 < f_4$ 时电路对应的工作状态，电流、电压降向量图。说明电路呈现容性、感性和谐振的条件。

(4) 画出 $X_C - f$ 、 $X_L - f$ 、 $X - f$ ， $Z - f$ 曲线，并简略分析频率变化引起各量变化的规律。

(5) 画出 $U_C - f$ 、 $U_L - f$ 、 $U_R - f$ 曲线。

(6) 绘制以上各图时，要求目的明确，只画出有代表性和有特征点即可。

(7) 认真填写实验报告中各项内容。

九、实验用仪器、仪表、设备表

序号	名称型号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板	自定	1	自行开发研制
2	电压源	+12V	1	
3	电压表	0~30V	1	
4	信号源	10HZ~1KHZ	1	
5	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

*实验十二 RC 选频网络特性测试

一、实验目的

- (1) 熟悉文氏电桥电路的结构特点及其应用。
- (2) 学会用交流毫伏表和示波器测定文氏桥电路的幅频特性和相频特性。

二、原理说明

文氏电桥电路是一个 RC 的串、并联电路，如图 1 所示。该电路结构简单，被广泛地用于低频振荡电路中作为选频环节，可以获得很高纯度的正弦波电压。

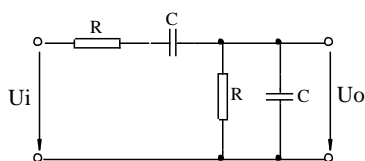


图 1

(1) 用函数信号发生器的正弦输出信号作为图 1 的激励信号 u_i ，并保持 U_i 值不变的情况下，改变输入信号的频率 f ，用交流毫伏表或示波器测出输出端相应于各个频率点下的输出电压 U_o 值，将这些数据画在以频率 f 为横轴， U_o 为纵轴的坐标纸上，一条光滑的曲线连接这些点，该曲线就是上述电路的幅频特性曲线。

文氏桥路的一个特点是其输出电压幅度不仅会随输入信号的频率而变，而且还会出现一个与输入电压同相位的最大值，如图 2 所示。

由电路分析得知，该网络的传递函数为

$$\beta = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)}$$

当角频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时， $|\beta| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{3}$ ，此时 u_o 与 u_i

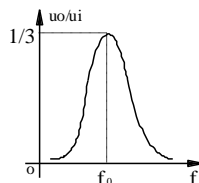


图2

同相。由图 2 可见 RC 串并联电路具有带通特性。

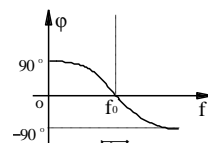


图3

(2) 上述电路的输入和输出分别接到双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入端，改变输入正弦信号的频率，观测相应的输入和输出波形间的

时延 τ 及信号的周期 T ，则两波形间的相位差为 $\phi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ = \phi_o - \phi_i$ （输出相位与输入相位之差）。

将各个不同频率下的相位差 ϕ 画在以 f 为横轴， ϕ 为纵轴的坐标纸上，用光滑的曲线将这些点连接起来，即是被测电路的相频特性曲线，如图 3 所示。

由电路分析理论得知，当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ ，即 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时， $\phi = 0$ ，即 u_o 与 u_i 同相位。

三、实验内容

(1) 测量 RC 串、并联电路的幅频特性。

1) 利用单元 11 中的元件或其它单元 $R=1K\Omega$ ， $C=0.1\mu F$ 组成图 1 线路。

2) 调节信号源输出电压为 3V 的正弦信号，接入图 1 的输入端；

3) 改变信号源的频率 f （由频率计读得），并保持 $U_i=3V$ 不变，测量输出电压 U_o （可先测量 $\beta=1/3$ 时的频率 f_0 ，然后再在 f_0 左右设置其它频率点测量。填入附表 1。

4) 取 $R=200\Omega$ ， $C=1\mu F$ ，重复上述测量。

(2) 测量 RC 串、并联电路的相频特性

将图 1 的输入 U_i 和输出 U_o 分别接至双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入端，改变输入正弦信号的频率，观测不同频率点时，相应的输入与输出波形间的时延 τ 及信号的周期 T 。两波形间的相位差为： $\phi = \phi_o - \phi_i = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ$ 。填入附表 2。

四、实验注意事项

由于信号源内阻的影响，输出幅度会随信号频率变化。因此，在调节输出频率时，应同时调节输出幅度，使实验电路的输入电压保持不变。

五、预习思考题

(1) 根据电路参数，分别估算文氏桥电路两组参数时的固有频率 f_0 。

(2) 推导 RC 串并联电路的幅频、相频特性的数学表达式。

六、实验报告

(1) 根据实验数据，绘制文氏桥电路的幅频特性和相频特性曲线。找出 f_0 ，并与理

论计算值比较，分析误差原因。

(2) 讨论实验结果。

七、实验用仪器、仪表及设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板	自定	1	自行开发研制
2	函数信号发生器	10HZ~10KHZ	1	
3	交流毫伏表		1	
4	示波器		1	
5	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

*实验十三 双口网络测试

一、实验目的

- (1) 加深理解双口网络的基本理论。
- (2) 掌握直流双口网络传输参数的测量技术。

二、原理说明

对于任何一个线性网络，我们所关心的往往只是输入端口和输出端口的电压和电流之间的相互关系，并通过实验测定方法求取一个极其简单的等值双口电路来替代原网络，此即为“黑盒理论”的基本内容。

(1) 一个双口网络两端口的电压和电流四个变量之间的关系，可以用多种形式的参数方程来表示。本实验采用输出口的电压 U_2 和电流 I_2 作为自变量，以输入口的电压 U_1 和电流 I_1 作为应变量，所得的方程称为双口网络的传输方程，如图 1 所示的无源线性双口网络（又称为四端网络）的传输方程为：

$$U_1 = AU_2 + BI_2; \quad I_1 = CU_2 + DI_2。$$

式中的 A、B、C、D 为双口网络的传输参数，其值完全决定于网络的拓扑结构及各支路元件的参数值。这四个参数表征了该双口网络的基本特性，它们的含义是：

$$A = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$B = \frac{U_{1S}}{I_{2S}} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

$$C = \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$D = \frac{I_{1S}}{I_{2S}} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

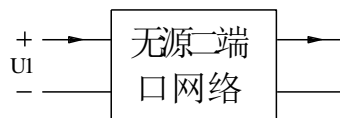


图 1

由上可知，只要在网络的输入口加上电压，在两个端口同时测量其电压和电流，即可求出 A、B、C、D 四个参数，此即为双端口同时测量法。

2、若要测量一条远距离输电线构成的双口网络，采用同时测量法很不方便。这时可采用分别测量法，即先在输入口加电压，而将输出口开路和短路，在输入口测量电压和电流，由传输方程可得：

$$R_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{A}{C} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$R_{1s} = \frac{U_{1s}}{I_{1s}} = \frac{B}{D} \quad (\text{令 } U_2=0, \text{ 即输出口短路时})$$

然后在输出口加电压，而将输入口开路和短路，测量输出口的电压和电流。此时可得

$$R_{2o} = \frac{U_{2o}}{I_{2o}} = \frac{D}{C} \quad (\text{令 } I_1=0, \text{ 即输入口开路时})$$

$$R_{2s} = \frac{U_{2s}}{I_{2s}} = \frac{B}{A} \quad (\text{令 } U_1=0, \text{ 即输入口短路时})$$

R_{1o} , R_{1s} , R_{2o} , R_{2s} 分别表示一个端口开路和短路时另一端口的等效输入电阻，这四个参数中只有三个是独立的（ $\because AD-BC=1$ ）。至此，可求出四个传输参数：

$$A = \sqrt{R_{1o} / (R_{2o} - R_{2s})}, \quad B = R_{2s}A, \quad C = A/R_{1o}, \quad D = R_{2o}C$$

3、双口网络级联后的等效双口网络的传输参数亦可采用前述的方法之一求得。从理论推得两个双口网络级联后的传输参数与每一个参加级联的双口网络的传输参数之间有如下关系：

$$A = A_1A_2 + B_1C_2$$

$$B = A_1B_2 + B_1D_2$$

$$C = C_1A_2 + D_1C_2$$

$$D = C_1B_2 + D_1D_2$$

三、实验内容

双口网络实验线路如图 2。将直流稳压电源的输出电压调到 10V，作为双口网络的输入。

(1) 按同时测量法分别测定两个双口网络的传输参数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 和 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 ，并列它们的传输方程，填入附表 1。

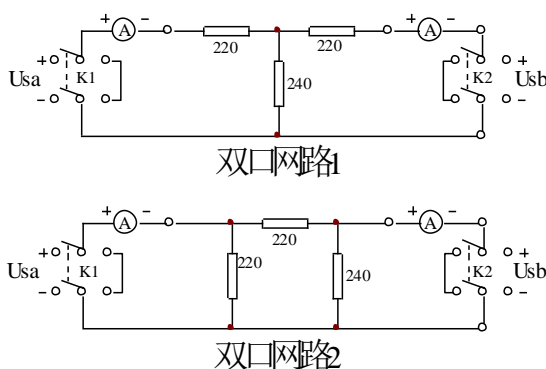


图 2

四、实验注意事项

(1) 用电流插头插座测量电流时，要注意判别电流表的极性 & 选取适合的量程（根据所给的电路参数，估算电流表量程）。

(2) 计算传输参数时， I 、 U 均取其正值。

五、预习思考题

(1) 试述双口网络同时测量法与分别测量法的测量步骤，优缺点及其适用情况。

(2) 本实验方法可否用于交流双口网络的测定？

六、实验报告

(1) 完成对数据表格的测量和计算任务。

(2) 列写参数方程。

(3) 验证级联后等效双口网络的传输参数与级联的两个双口网络传输参数之间的关系。

(4) 总结、归纳双口网络的测试技术。

七、实验用仪器、仪表及设备表

序号	名 称 型 号	技术特性及说明	数量	备注
1	电路原理箱或板	自定	1	自行开发研制
2	直流稳压电源	0~24V, +5V	1	
3	直流毫安表		2	
4	直流电压表或万用表		1	
5	2 号实验导线	二端 2 号镀金插头	n	

附表

实验三 电阻元件伏安特性测量实验记录表

表 1 线性电阻元件正（反）向特性测量

 $R=120\ \Omega/2W$

给定电压值 (V)	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
测量电流值 (mA)											
计算电阻值 (Ω)											

表 2 线性电阻元件正（反）向特性测量

 $R=120\ \Omega/2W$

给定电流值 (mA)	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
测量电压值 (V)											
计算电阻值 (Ω)											

表 3 线性电阻元件正（反）向特性测量

 $R=120\ \Omega/2W$

给定电压值 (V)	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
测量电流值 (mA)											
计算电阻值 (Ω)											

表 4 线性电阻元件正（反）向特性测量

R=120 Ω /2W

给定电流值 (mA)	10	8	6	4	2	0	-2	-4	-6	-8	-10
测量电压值 (V)											
计算电阻值 (Ω)											

注：表 1、表 2 为方法一（电流表外接）的测试记录；表 3、表 4 为方法二（电压表外接）的测试记录。

表 5 二极管 IN5401 正向特性测量（方法一）

正向电流 (mA)	0										10
正向电压 (V)	0										

表 6 二极管 IN5401 反向特性测量（方法一）

反向电压 (V)	0										20
反向电流 (μ A)	0										

表 7 二极管 IN5401 正向特性测量（方法二）

正向电流 (mA)	0										10
正向电压 (V)	0										

表 8 二极管 IN5401 反向特性测量（方法二）

反向电压 (V)	0										20
反向电流 (μ A)	0										

表 9 发光二极管高亮 $\Phi 3$ 正向特性测量（方法一）

正向电流 (mA)	0										10
正向电压 (V)	0										

表 10 发光二极管高亮 $\Phi 3$ 反向特性测量（方法一）

反向电压 (V)	0										20
反向电流 (μ A)	0										

表 11 发光二极管高亮 $\Phi 3$ 正向特性测量（方法二）

正向电流 (mA)	0										10
正向电压 (V)	0										

表 12 发光二极管高亮 $\phi 3$ 反向特性测量（方法二）

反向电压 (V)	0										20
反向电流 (μA)	0										

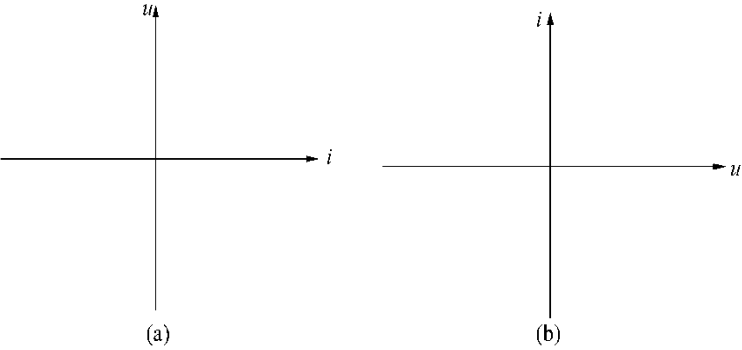


图 1 线性电阻元件特性曲线

(a) 线性电阻元件 $u-i$; (b) 线性电阻元件 $i-u$

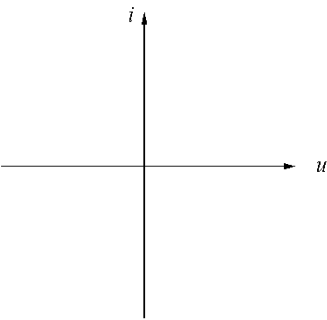


图 2 二极管 IN5401 特性曲线

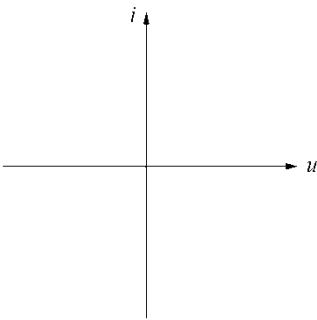


图 3 发光二极管（高亮）特性曲线

实验四 基尔霍夫定律实验记录表

表 1 线性对称电路（对应图 1）

电路参数	测 量 电 压 (V)								测 量 电 流 (mA)					
		U ₁	U ₂	U ₅	U _{sa}	U _{sb}			I ₁	I ₂	I ₅	I	I	I
U _{SA} = 5 V														
U _{SB} = 12 V	验	网络名称												
R1=220 Ω		Σ U=												
R2=220 Ω	证	节点名称												
R5=220 Ω														
		Σ I=												

表 2 线性对称电路（对应图 2）

电路参数	测 量 电 压 (V)								测 量 电 流 (mA)					
		U ₁	U ₂	U ₃	U _{sa}				I ₁	I ₂	I ₃	I	I	I
U _{SA} =5 V														
R1=220 Ω	验	网络名称												
R2=220 Ω		Σ I=												
R3=220 Ω	证	节点名称												
		Σ I=												

表 3 线性不对称电路（对应图 3）

电路参数	测 量 电 压 (V)								测 量 电 流 (mA)					
		U ₄	U ₅	U ₆	U _{sa}	U _{sb}			I ₄	I ₅	I ₆	I	I	I
U _{SA} = 5 V														
U _{SB} = 12 V	验	网络名称												
R4=270 Ω		Σ U=												
R5=200 Ω	证	节点名称												
R6=240 Ω		Σ I=												

表 4 非线性对称电路（对应图 3）

电路参数	测 量 电 压 (V)								测 量 电 流 (mA)					
		U ₁	U ₂	U ₃	U _{sa}	U _{sb}			I ₁	I ₂	I ₃	I	I	I
U _{SA} = 5 V														
U _{SB} = 12 V	验	网络名称												
R1=220 Ω		Σ U=												
R2=220 Ω	证	节点名称												
R3=220 Ω		Σ I=												

表 5 非线性不对称电路（对应图 3）

电路参数	测 量 电 压 (V)								测 量 电 流 (mA)					
		U ₄	U ₅	U ₆	U _{sa}	U _{sb}			I ₄	I ₅	I ₆	I	I	I
U _{SA} = 5 V														
U _{SB} = 12 V	验	网络名称 Σ U=												
R4=270 Ω														
R5=200 Ω														
R6=240 Ω	证	节点名称 Σ I=												

- 注 1. U_{SA}、U_{SB} 电源电压根据实验时选用值填写。
2. U、I、R 下标均根据自拟电路参数或选用电路参数对应填写。

实验五 戴维南定理和诺顿定理实验记录表

表 1 戴维南等效参数计算

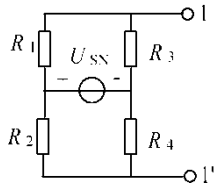
序号	计 算		有源一端口电路参数
1	$U_{oc}=U_{11'}$	V	<div><div>$U_{SN}=12V$ $R_1=120\ \Omega$ $R_2=360\ \Omega$ $R_3=240\ \Omega$ $R_4=180\ \Omega$</div></div>
2	$I_S=I_{11'}$	mA	
3	$R_{eq}=R_{11'}$	Ω	

表 2 等效电压源电压 U_{oc} 测量结果

序号	采取方法	U_{oc} (V)	条 件 说 明
1	直接测量		N 网络有源 $U_{SN} =12V$
2	补偿法之一		N 网络有源，外加电源 U_S 电压从 1V 增加到 1、2 两端等电位时（发光管不亮）
3	补偿法之二		N 网络有源，外加电源 U_S 电压从 1V 增加到 1、2 两端等电位时（电压表指 0）
4	补偿法之三		N 网络有源，外加电源 U_S 电压从 1V 增加到 1、2 两端等电位时（电流表或检流计指 0）

表 3 戴维南等效电阻 R_{eq} 测量（计算）结果

序号	采取方法		测量（计算） R_{eq}	条 件 说 明
1	开路电压、 短路电流法		$U_{oc} = \quad V, I_{SC} = \quad mA$ $R_{eq} = U_{oc} / I_{SC} = \quad \Omega$	N 网络有源 $U_{SN} = 12V$
2		伏安法	$U_S = \quad V, I_{S2} = \quad mA$ $R_{eq} = U_S / I_{S2} = \quad \Omega$	N 网络无源 外加电源 $U_S = 10V$
3	半流法		$R_{eq} = R_w = \quad \Omega$	N 网络无源 外加电源 $U_S = 10V$
4	半压法		$R_{eq} = R_w = \quad \Omega$	N 网络无源 外加电源 $U_S = 10V$
5	直 接 测	万用表	$R_{eq} = \quad \Omega$	N 网络无源
6		单臂电桥	$R_{eq} = \quad \Omega$	N 网络无源（自备仪器）

表 4 验证戴维南定理

序号	电 路	外接负载 (Ω)	测量负载电压、电流	
			U_{R6} (V)	I_{R6} (mA)
1	戴维南等效电路电压源 U_{oc} 串 R_{eq} $U_{oc} = 3.9V, R_{eq} = 200 \Omega$	100 Ω		
2	原 N 网络有源 $U_{SN} = 12V$ 网络端口 1-1' 外接	100 Ω		
3	比较 1、2 测量结果 进行说明			

表 5 验证诺顿定理

序号	电 路		外接负载 (Ω)	测量负载电压、电流	
				U_{R6} (V)	I_{R6} (mA)
1	诺顿等效电路电流源 I_{SC} 并 R_{eq} $I_{SC}=18.8\text{mA}$, $R_{eq}=200\Omega$		100Ω		
2	原 N 网络有源 $U_{SN}=12\text{V}$ 网络端口 1-1' 外接		100Ω		
3	比较 1、2 测量结果 进行说明				

实验六 一阶动态电路实验记录表

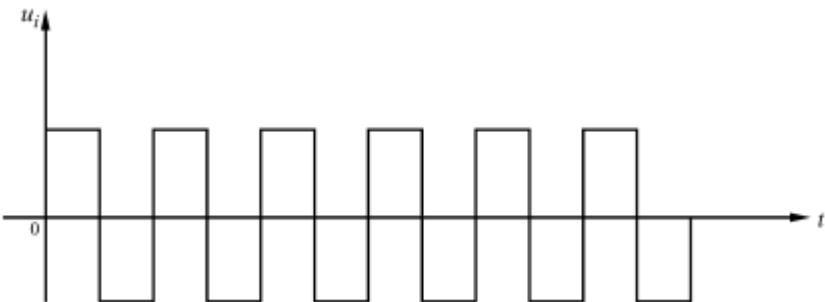


图 1 输入波形

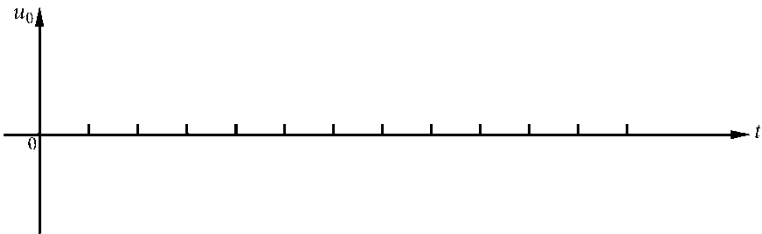


图 2 RC 微分

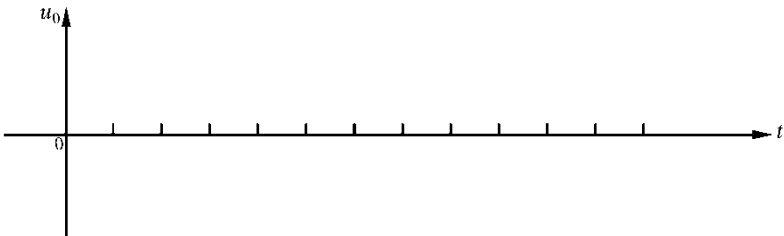


图 3 RL 微分

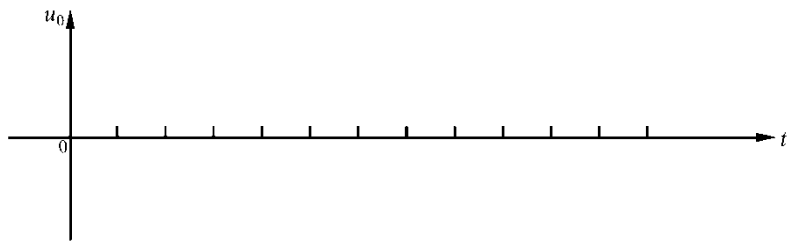


图 4 RC 积分

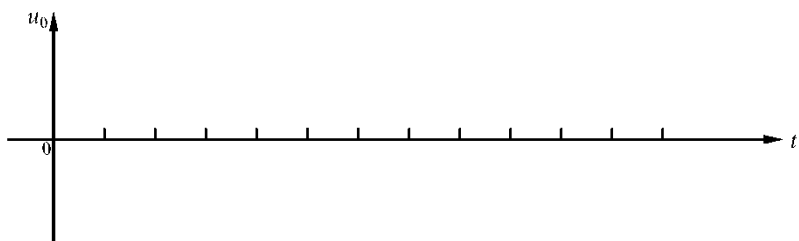


图 5 RL 积分

实验七 二阶电路动态过程的研究实验记录表

表1 二阶电路动态过程记录一 $L=5\text{mH}$, $C=0.1\mu\text{F}$

序号	调节电路电阻 R_w	动态过程图形记录		条件与参数
1	使电路电阻 $R < 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=25\ \Omega$
2	使电路电阻 $R > 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=500\ \Omega$
3	使电路电阻 $R = 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=120\ \Omega$
计算		$2\sqrt{L/C} =$, 振荡固有频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$		

表 2 二阶电路动态过程记录三 L2=10mH, C2=0. 22 μ F

序号	调节电路电阻 R_w	动态过程图形记录		条件与参数
1	使电路电阻 $R < 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=150\ \Omega$
2	使电路电阻 $R > 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=450\ \Omega$
3	使电路电阻 $R = 2\sqrt{L/C}$			$U_s=3V$ $f=1KHz$ $R=72\ \Omega$
计算		$2\sqrt{L/C} =$, 振荡固有频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$		

实验八 R、L、C 元件阻抗特性测试表

表 1 RLC 元件阻抗的频率特性

频率 f (Hz)		2300Hz	2000Hz	1400Hz	800Hz
R	$U_R (V) V_{p-p}$				
	$U_r (V)$				
	$I_R = \frac{U_r}{r} (mA)$				
	$R = \frac{U_R}{I_R} (K\Omega)$				
L	$U_L (V) V_{p-p}$				
	$U_r (V)$				
	$I_L = \frac{U_r}{r} (mA)$				
	$X_L = \frac{U_L}{I_L} (K\Omega)$				
C	$U_C (V) V_{p-p}$				
	$U_r (V)$				
	$I_C = \frac{U_r}{r} (mA)$				
	$X_C = \frac{U_C}{I_C} (K\Omega)$				

实验十一 R、L、C 串、并联谐振实验记录表

表 1 RLC 串联电路测试记录

序号	电路状态		测量					计算				
			f	U_R	U_L	U_C	U_X	Z	I	X_L	X_C	X
1	谐振											
2	$0.7U_{R0}$	$f_1 < f_0$										
		$f_2 > f_0$										
3	$0.5U_{R0}$	$f_3 < f_0$										
		$f_4 > f_0$										
4	$0.3U_{R0}$	$f_5 < f_0$										
		$f_6 > f_0$										
5	当 U_C 最大时											
	当 U_L 最大时											
电路参数: $U_s = 3V$, $R1 = 100\Omega$, $L1 = 5mH$, $C1 = 0.1\mu F$ 计算: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$, $Q =$												

表 2 RLC 串联电路测试记录

序号	电路状态		测量					计算				
			f	U_R	U_L	U_C	U_X	Z	I	X_L	X_C	X
1	谐振											
2	$0.7U_{R0}$	$f_1 < f_0$										
		$f_2 > f_0$										
3	$0.5U_{R0}$	$f_3 < f_0$										
		$f_4 > f_0$										
4	$0.3U_{R0}$	$f_5 < f_0$										
		$f_6 > f_0$										
5	当 U_C 最大时											
	当 U_L 最大时											
电路参数: $U_s = 3V$, $R1 = 100\Omega$, $L2 = 10mH$, $C2 = 0.22\mu F$ 计算: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$, $Q =$												

表 3 RLC 串联电路测试记录

序号	电路状态		测量					计算				
			f	U_R	U_L	U_C	U_X	Z	I	X_L	X_C	X
1	谐振											
2	$0.7U_{R0}$	$f_1 < f_0$										
		$f_2 > f_0$										
3	$0.5U_{R0}$	$f_3 < f_0$										
		$f_4 > f_0$										
4	$0.3U_{R0}$	$f_5 < f_0$										
		$f_6 > f_0$										
5	当 U_C 最大时											
	当 U_L 最大时											
电路参数： $U_s = 3V$, $R_w = 200\Omega$, $L2 = 10mH$, $C2 = 0.22\mu F$ 计算： $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$, $Q =$												

- 注意： 1. 电压 U_{R0} 为谐振时串联电阻 R_w （或 $R1$ ）上的电压值；
2. 表 1、2 用于电阻值相同，LC 参数不同时测量结果的比较；
3. 表 2、3 用于电阻值不同，LC 参数相同时测量结果的比较。

表 4 RLC 并联电路测试记录

序号	电路状态		测量				计算							
			f	U_{R1}	U_{R2}	$U_{C(L)}$	Z	I_{R1}	I_{R2}	I_L	I_C	B_L	B_C	B
1	谐振													
2	$0.7U_{R0}$	$f_1 < f_0$												
		$f_2 > f_0$												
3	$0.5U_{R0}$	$f_3 < f_0$												
		$f_4 > f_0$												
电路参数: $U_s = 3V$, $R1 = 100\Omega$, $R2 = 100\Omega$, $L1 = 5mH$, $C1 = 0.1\mu F$ 计算: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$, $Q =$														

- 注意： 1. 表中 U_{R0} 为 RLC 并联电路谐振时，并联元件两端的电压；
2. 并联谐振表 4、表 5 用于 R_2 、L、C 元件并联， R_2 不变，而 L、C 元件改变时，测量结果的记录与比较。

表 5 RLC 并联电路测试记录

序号	电路状态		测量				计算							
			f	U_{R1}	U_{R2}	$U_{C(L)}$	Z	I_{R1}	I_{R2}	I_L	I_C	B_L	B_C	B
1	谐振													
2	$0.7U_{R0}$	$f_1 < f_0$												
		$f_2 > f_0$												
3	$0.5U_{R0}$	$f_3 < f_0$												
		$f_4 > f_0$												
电路参数： $U_s = 3V$, $R1 = 100\Omega$, $R2 = 100\Omega$, $L1 = 5mH$, $C2 = 0.22\mu F$ 计算： $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} =$, $Q =$														

注意： 表中 U_{R0} 为 RLC 并联电路谐振时，并联元件 RLC 两端的电压。

实验十二 RC 选频网络特性测试表

表 1 幅频响应特性测量值

R=1K Ω C=0.1 μ F	f (Hz)	1800Hz	430Hz	200Hz
	U_0 (V)			
R=200 Ω C=1 μ F	f (Hz)			
	U_0 (V)			

表 2 相频响应特性测量值

R=1K Ω C=0.1 μ F	f (Hz)	
	T (ms)	
	τ (ms)	
	φ	
R=200 Ω C=1 μ F	f (Hz)	
	T (ms)	
	τ (ms)	
	φ	

实验十三 双口网络测试表

表 1 传输参数的测量

双口网络 I	输出端开路 Isb=0	测量值			计算值	
		$U_{sa0} \text{ (V)}$	$U_{sb0} \text{ (V)}$	$I_{sa_0} \text{ (mA)}$	A ₁	B ₁
	输出端短路 Usb=0	$U_{sa_s} \text{ (V)}$	$I_{sa_s} \text{ (mA)}$	$I_{sb_s} \text{ (mA)}$	C ₁	D ₁
双口网络 II	输出端开路 Isb=0	测量值			计算值	
		$U_{sa0} \text{ (V)}$	$U_{sb0} \text{ (V)}$	$I_{sa_0} \text{ (mA)}$	A ₂	B ₂
	输出端短路 Usb=0	$U_{sa_s} \text{ (V)}$	$I_{sa_s} \text{ (mA)}$	$I_{sb_s} \text{ (mA)}$	C ₂	D ₂