

普通高等教育电气信息类“十三五”规划教材

电工电子学实验

第二版

 姜学勤 高德欣 王逸隆 编



化学工业出版社

普通高等教育电气信息类“十三五”规划教材

电工电子学实验

第二版

姜学勤 高德欣 王逸隆 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书针对高等院校非电类专业电工电子学课程所涉及的内容,编写了包括直流、交流、三相电路、电动机的控制、动态电路及模拟电子技术和数字电子技术等相关实验。

本书依据教学体系,内容由浅入深地进行安排,精选了22个基础实验和5个创新性实验。基本实验给出了实验电路、实验仪器设备及实验原理、内容,详细而富有条理;而设计与仿真实验内容让读者根据要求,自行设计实验方案,独立完成实验。

本书可作为高等院校非电类专业电工电子学实验课程的教材,也可供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子学实验/姜学勤,高德欣,王逸隆编.—2版.
北京:化学工业出版社,2016.12
普通高等教育电气信息类“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-28538-6

I. ①电… II. ①姜… ②高… ③王… III. ①电工技术-实验-高等学校-教材②电子技术-实验-高等学校-教材
IV. ①TM-33②TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第277020号

责任编辑:郝英华

装帧设计:张辉

责任校对:吴静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张8 $\frac{3}{4}$ 字数205千字 2016年11月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:22.00元

版权所有 违者必究

前 言

随着现代科技的不断进步和社会建设的需求，作为培养高级工程技术人才的高等工科院校，仅仅培养学生掌握理论知识是远远不够的，更重要的是培养学生较强的实验技能和设计创新能力。为此，2010 年我们编写出版了《电工学实验》，经过五年多的使用，本书受到了广大读者的欢迎。但随着电工电子学课程的改革和技术的不断发展，对教材的内容也提出了新的要求。因此，本书在保持第一版特色的基础上，做出了相应调整。

本书针对高等工科院校非电类专业电工电子学课程所涉及的内容，编写了包括直流、交流、三相电路、电动机的控制、动态电路及模拟电子技术和数字电子技术等相关实验。本书配备了大量实验仪器及电路元器件的图片和使用说明，从实验目的、实验原理、实验内容、数据处理等不同角度讲解实验的基本方法。在第一版精选的 20 个基础实验外，又新增了 PLC 基本操作练习和基本指令综合实验两个实验，以备不同专业选用。附录中也新增了可编程控制器的简介，作为新增实验的参考资料。在创新设计性实验方面以模拟仿真电路软件为平台，精选了 5 个创新设计性实验，使学生能够将自己设计的电路进行仿真，以确认是否达到设计目的。同时让学生能够真正感受到通过自己的设计完成的产品，提高学生的创作兴趣及创新能力。

本书依据教学体系，内容由浅入深地进行安排。基本实验给出了实验电路、实验仪器及实验原理、内容，详细而富有条理；而设计与仿真实验内容让学生根据要求，自行设计实验方案，独立完成实验。

全书共分 5 章，由青岛科技大学自动化学院姜学勤、高德欣、王逸隆编写。

由于编者水平所限，书中不妥之处，恳请读者给予批评指正。

编者
2016 年 10 月

目 录

第 1 章 实验概述	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验课前准备	1
1.3 实验操作规程	2
1.4 实验安全	2
1.5 实验总结与报告	2
第 2 章 实验基础知识	4
2.1 测量的基本内容	4
2.2 常用电路元器件基础知识	4
2.2.1 电阻器	4
2.2.2 电位器	7
2.2.3 电容器	9
2.2.4 电感器及互感器	12
2.2.5 开关	13
2.3 实验装置介绍	14
2.3.1 电源	14
2.3.2 测量仪表	16
2.3.3 负载	20
2.3.4 报警及复位	22
2.4 常用电工仪表的使用	22
2.4.1 函数信号发生器	22
2.4.2 万用表	26
2.4.3 示波器	28
2.4.4 兆欧表	31
2.5 测量数据处理	33
2.6 测量数据误差分析	34
第 3 章 电工技术实验	36
3.1 实验一：常用电子仪器的使用	36
3.2 实验二：电路元件伏安特性的测绘	39
3.3 实验三：叠加定理、齐性定理与戴维南定理的验证	42
3.4 实验四：一阶电路响应测试	45
3.5 实验五： R ， L ， C 元件阻抗特性的测定	48
3.6 实验六：交流电路等效参数的测量	51

3.7	实验七：单相正弦交流电路功率因数的提高	54
3.8	实验八：RLC 串联谐振电路的研究	57
3.9	实验九：负载星形、三角形连接的三相交流电路研究	60
3.10	实验十：三相电路的功率测量	62
3.11	实验十一：功率因数及相序测量	66
3.12	实验十二：三相异步电动机的正反转控制	68
3.13	实验十三：PLC 的基本操作练习	70
3.14	实验十四：PLC 基本指令综合练习	72
第 4 章	电子技术实验	74
4.1	实验十五：单级放大电路	74
4.2	实验十六：两级负反馈放大电路	80
4.3	实验十七：串联型晶体管稳压电源	85
4.4	实验十八：集成运算放大器的线性应用	90
4.5	实验十九：集成运算放大器的非线性应用	93
4.6	实验二十：TTL 与非门的参数及电压传输特性测试	95
4.7	实验二十一：组合逻辑电路的设计	97
4.8	实验二十二：触发器	99
第 5 章	设计性电路实验与仿真	103
5.1	设计性电路实验目的与步骤	103
5.2	实验仿真与设计性电路实验	104
5.2.1	电路定理的仿真	104
5.2.2	电路的暂态分析	107
5.2.3	电阻温度计设计	109
5.2.4	受控源设计	111
5.2.5	感性负载断电保护电路设计	113
附录 1	仿真软件 (Multisim) 简介	116
附录 1.1	Multisim 软件界面	116
附录 1.2	Multisim 仿真元件模型	118
附录 1.3	电路分析与仿真的主要步骤	120
附录 1.4	虚拟仪器的使用	121
附录 2	可编程控制器 (PLC) 简介	126
附录 3	THD-1 型数字电路实验箱使用说明	129
参考文献		132

第1章 实验概述

1.1 实验目的

电工学是高等学校非电类专业一门很重要的专业基础课。实验作为该课程的重要教学环节，可以做到理论联系实际，加深对课堂知识的理解，对于提高学生研究和解决问题的能力，培养学生的创新能力和协作精神具有重要作用。

通过电工实验，可使学生得到电路基本实践技能训练，学会运用所学理论知识判断和解决实际问题，加深对电路理论的理解和认识；学会使用常用电工仪表及相关的仪器设备；学会使用设计与仿真软件 Multisim 进行电路设计与仿真；能根据要求正确连接实验电路，能分析并排除实验中出现的故障；能运用理论知识对实验现象、结果进行分析和处理；能根据要求进行简单电路的设计，并正确选择合适的电路元件及适用的仪器设备。

一个实验效果如何，决定于实验各个环节的完成质量。下面介绍实验各环节的注意事项。

1.2 实验课前准备

实验课前准备的第一个环节即实验预习。预习是实验能顺利进行的保证，也有利于提高实验质量和效率。

对于验证性实验，实验课前预习应做到如下几点。

① 仔细阅读实验指导书，了解本次实验的主要目的和内容，复习并掌握与实验有关的理论知识。

② 根据给出的实验电路与元件参数，进行必要的理论计算，以便于用理论指导实践。

③ 了解实验中所用仪器仪表的使用方法（包括数据读取），能熟记操作要点。

④ 掌握实验内容的工作原理和测量方法，明确实验过程中应注意的事项。

对于设计性实验，除了以上要求，还应做到如下几点。

① 理解实验所提出的任务与要求，阅读有关的技术资料，学习相关理论知识。

② 进行电路方案设计，选择电路元件参数。

③ 使用仿真软件进行电路性能仿真和优化设计，进一步确定所设计的电路原理图和元器件。

④ 拟定实验步骤和测量方法，选择合适的测量仪器，画出必要的记录表格备用。

⑤ 写出预习报告（无论验证性还是设计型实验）。

1.3 实验操作规程

在完成理论学习、实验课前预习后，就进入实验操作阶段。进行实验操作时要做到如下几点。

① 教师首先检查学生的预习报告，检查学生是否了解本次实验的目的、内容和方法。预习（报告）通过了，方允许进行实验操作。

② 认真听取指导老师对实验设备、实验过程的讲解，对易出差错的地方加以注意并做出标记（笔记）。

③ 按要求（设计）的实验电路接线。一般先接主电路，后接控制电路；先串联后并联；导线尽量短，少接头，少交叉，简洁明了，便于测量。所有仪器和仪表，都要严格按照规定的正确接法接入电路（例如，电流表及功率表的电流线圈一定要串接在电路中，电压表及功率表的电压线圈一定要并接在电路中）。

④ 完成电路接线后，要进行复查。对照实验电路图，逐项检查各仪表、设备、元器件连接是否正确，确定无误后，方可通电进行实验。如有异常，立即切断电源，查找故障原因。

⑤ 观察现象，测量数据。接通电源后，观察被测量是否合理。若合理，则读取并记录数据。否则应切断电源，查找原因，直至正常。对于指针式仪表，针、影成一线时读数。数字式、指针式仪表都要注意使用合适的量程（并不是量程越大越好，被测量达到量程的 $\frac{2}{3}$ 以上为好），减小误差。并且还要注意量程、单位、小数点位置及指针格数与量程换算（指针式）。量程变换时要切断电源。

⑥ 记录所有按要求读取的数据，数据记录（记入表格）要完整、清晰，一目了然。要尊重原始记录，实验后不得涂改。注意培养自己的工程意识。

⑦ 本次实验内容全部完成后，可先断电，但暂不拆线，将实验数据结果交指导老师检查无误后，方可拆线。并整理好导线、仪器、仪表及设备，物归原位。

1.4 实验安全

① 实验线路必须仔细检查，经指导教师确认无误后方可通电。

② 使用仪器要严格遵守操作规程，如有损坏应及时报告，找出原因，并吸取教训和按规定赔偿。

③ 实验中，每次改变接线前都应关闭电源。

④ 发生事故时，应首先切断电源，保持现场并立即报告指导教师。

1.5 实验总结与报告

实验的最后一个环节是实验总结与报告。即对实验数据进行整理，绘制波形和图表，分析实验现象，撰写实验报告。每次实验，每个参与者都要独立完成一份实验报告。撰写实验

报告应持严肃认真、实事求是的科学态度。实验结果与理论有较大出入时，不得随意修改实验数据结果，不得用凑数据的方法来向理论靠拢，而要重新进行一次实验，找出引起较大误差的原因，同时用理论知识来解释这种现象。

实验报告的格式一般如下。

- ① 实验名称；
- ② 实验目的；
- ③ 实验原理；
- ④ 实验仪器设备；
- ⑤ 实验电路；
- ⑥ 实验数据与计算（图表、曲线要规范，标明坐标物理量及单位符号）；
- ⑦ 实验数据结果分析与结论；
- ⑧ 由实验引发的问题思考及解决方案（探讨）。

第 2 章 实验基础知识

2.1 测量的基本内容

- ① 电量的测量。如电流、电压、功率的测量。
- ② 电路参数的测量。如电阻、电容、电感、阻抗、品质因数、等效参数、时间常数、损耗等的测量
- ③ 电信号波形参数的测量。如频率、周期、相位、失真度、调幅度、调频指数等的测量。
- ④ 电路性能的测量。如放大量、衰减量、灵敏度、频率特性等的测量。
- ⑤ 器件特性测量。如伏安特性、传输特性、频率特性等。

2.2 常用电路元器件基础知识

2.2.1 电阻器

电阻器是电路元件中应用最广泛的一种，在电子设备中约占元件总数的 30% 以上，其质量的好坏对电路工作的稳定性有极大的影响。电阻器的主要用途是稳定和调节电路中的电流和电压，还可用做分流器、分压器和消耗电能的负载等。

(1) 电阻器的分类

电阻器按结构可分为固定式和可变式两大类。

固定式电阻器一般称为“电阻”。由于制作材料和工艺的不同，可分为膜式电阻、实芯电阻、金属绕线电阻 (RX) 和特殊电阻四种类型。

膜式电阻包括：碳膜电阻 RT、金属膜电阻 RJ、合成膜电阻 RH 和氧化膜电阻 RY 等。

实芯电阻包括：有机实芯电阻 RS 和无机实芯电阻 RN。

特殊电阻包括：MC 型光敏电阻和 MF 型热敏电阻。

电位器是一种具有三个接头的可变式电阻器，其阻值在一定范围内连续可调。

常用电阻器的外形和符号如图 2-1 所示。电阻器的型号命名详见表 2-1。

(2) 电阻器的型号命名

电阻器的型号命名如表 2-1 所示。

示例：RJ71—0.125—5.1kI 型电阻的命名及含义如下。

	R	J	7	1	0.125	5.1k	I	
主称：电阻器								允许误差：1级±5%
材料：金属膜								
特征：精密								标称阻值：5.1kΩ
序号：1								额定功率： $\frac{1}{8}$ W

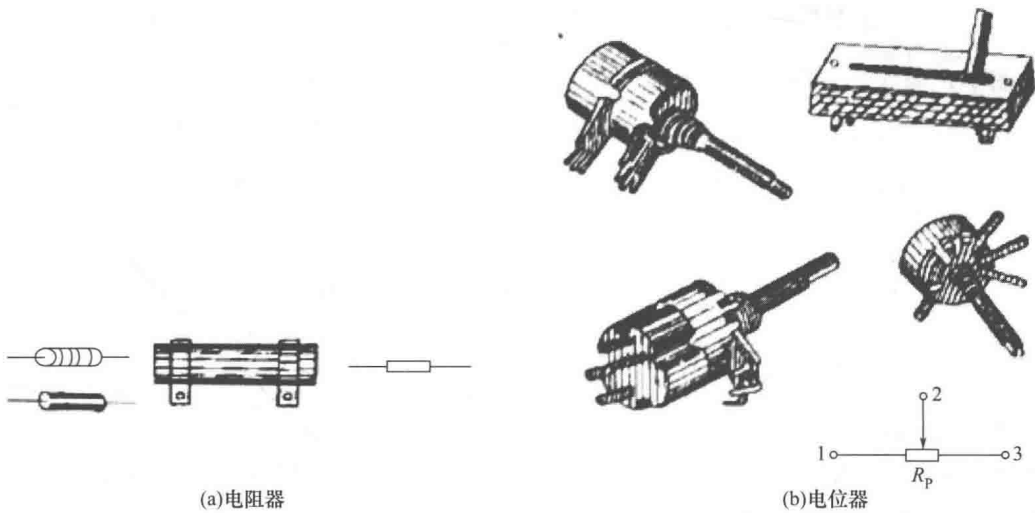


图 2-1 常用电阻器外形及符号

这是精密金属膜电阻器，其额定功率为 $\frac{1}{8}$ W，标称电阻值为 $5.1\text{k}\Omega$ ，允许误差为 $\pm 5\%$ 。

表 2-1 电阻器的型号命名

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
用字母表示主称		用字母表示材料		用数字或字母表示特征		用数字表示序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	
R	电阻器	T	碳膜	1, 2	普通	包括： 额定功率 阻值 允许误差 精度等级
RP	电位器	P	硼碳膜	3	超高频	
		U	硅碳膜	4	高阻	
		C	沉积膜	5	高温	
		H	合成膜	7	精密	
		I	玻璃釉膜	8	电阻器——高压 电位器——特殊函数	
		J	金属膜			
		Y	氧化膜			
		S	有机实芯	9	特殊	
		N	无机实芯	G	高功率	
		X	线绕	T	可调	
		R	热敏	X	小型	
		G	光敏	L	测量用	
		M	压敏	W	微调	
				D	多圈	

(3) 电阻器的主要性能指标

1) 额定功率 电阻器的额定功率是指在规定的环境温度和湿度下，假定周围空气不流通，长期连续负载而不损坏或基本不改变性能的情况下，电阻器上允许消耗的最大功率。当超过额定功率时，电阻器的阻值将发生变化，甚至发热烧毁。为保证安全使用，一般选其额定功率比它在电路中消耗的功率高 1~2 倍。

额定功率分 19 个等级，常用的有 $\frac{1}{20}\text{W}$ 、 $\frac{1}{8}\text{W}$ 、 $\frac{1}{4}\text{W}$ 、 $\frac{1}{2}\text{W}$ 、 1W 、 2W 、 4W 、 5W 等。在电路图中，非线性电阻器额定功率的符号表示法如图 2-2 所示。

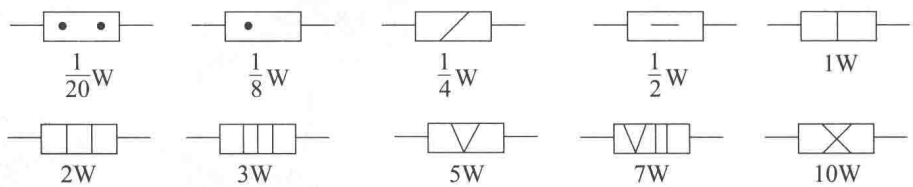


图 2-2 额定功率的符号表示法

2) 标称阻值 标称阻值是产品标注的“名义”阻值，其单位为欧姆 (Ω)、千欧 ($\text{k}\Omega$)、兆欧 ($\text{M}\Omega$)。

3) 允许误差 允许误差是指电阻器和电位器实际阻值对于标称阻值的最大允许偏差范围，它表示产品的精度。允许误差等级如表 2-2 所示。绕线电位器允许误差一般小于 $\pm 10\%$ ，非绕线电位器的允许误差一般小于 $\pm 20\%$ 。

表 2-2 允许误差等级

级别	005	01	02	I	II	III
允许误差	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$

电阻器的阻值和误差一般都用数字标印在电阻器上，但体积很小的和一些合成的电阻器，其阻值和误差常用色环来表示。在靠近电阻器的一端画有四道或五道（精密电阻）色环，其中第一、二道色环以及精密电阻的第三道色环都表示其相应位数的数字；其后的一道色环则表示前面数字乘以 10 的 n 次幂；最后的色环表示阻值的容许误差。各种颜色所代表的意义如表 2-3 所示。

例如，图 2-3 (a) 中，电阻器的第一、二、三、四道色环分别为黄、紫、黄、金色，则该电阻的阻值为 $R = (4 \times 10 + 7) \times 10^4 = 470\text{k}\Omega$ ，误差为 $\pm 5\%$ ；图 2-3 (b) 中，电阻器的第一、二、三、四、五道色环分别为白、黑、黑、金、绿色，则该电阻的阻值为

$$R = (9 \times 100 + 0 \times 10 + 0) \times 10^{-1} = 90\Omega$$
，误差为 $\pm 0.5\%$

表 2-3 色环颜色的意义

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝
代表数值	0	1	2	3	4	5	6
容许误差	F ($\pm 1\%$)	G ($\pm 2\%$)				D ($\pm 0.5\%$)	G ($\pm 0.25\%$)
颜色	紫	灰	白	金	银	本色	
代表数值	7	8	9				
容许误差	B ($\pm 0.1\%$)			J ($\pm 5\%$)	K ($\pm 10\%$)	($\pm 20\%$)	



图 2-3 阻值和误差的色环标记

(4) 电阻器的简单测试

测量电阻的方法有很多,可用欧姆表、电阻电桥和数字欧姆表直接测量;也可根据欧姆定律 $R=U/I$,通过测量流过电阻的电流 I 及电阻上压降 U 来间接测量电阻。

当测量精度要求较高时,采用电阻电桥来测量电阻。电阻电桥有单臂电桥和双臂电桥两种,这里不作详细介绍。

当测量精度要求不高时,可直接用欧姆表测量电阻。现以 MF—20 型万用表为例,介绍测量电阻的方法,首先将万用表的功能选择波段开关置“ Ω ”挡,量程波段开关置合适挡。将两根测试笔短接,表头指针应在刻度线 0 点;若不在 0 点,则要调节“ Ω ”旋钮(0 欧姆调整电位器)回零。调零后即可把被测电阻串接于两根测试笔之间,此时表头指针偏转,待稳定后可从刻度线上直接读出所示数值,再乘上实际选择的量程,即可得到被测电阻的阻值。当另换一量程时需要再次短接两测试笔,重新调零。每换一量程,都要重新调零。

特别指出的是,在测量电阻时,不能用双手同时捏住电阻或测试笔,否则人体电阻将会与被测电阻并联在一起,表头上指示的数值就不单纯是被测电阻的阻值了。

(5) 电阻器选用常识

① 根据电子设备的技术指标和具体要求选用电阻的型号和误差等级。

② 为提高设备的可靠性,延长设备的使用寿命,应选用额定功率大于实际消耗功率的 1.5~2 倍。

③ 电阻装接前要进行测量、核对,尤其是在精密电子仪器设备装配时,还需经人工老化处理,以提高其稳定性。

④ 在装配电子仪器时,若所用为非色环电阻,则应将电阻标称值标志朝上,且标志顺序一致,以便于观察。

⑤ 焊接电阻时,烙铁停留时间不宜过长。

⑥ 选用电阻时应根据电路信号频率的高低来选择。一个电阻可等效成一个 RLC 二端线性网络,如图 2-4 所示。不同类型的电阻, R 、 L 、 C 三个参数的大小有很大差异。绕线电阻本身是电感线圈,所以不能用于高频电路中。薄膜电阻中,若电阻体上刻有螺旋槽,其工作频率在 10MHz 左右;未刻螺旋槽的工作频率则更高。

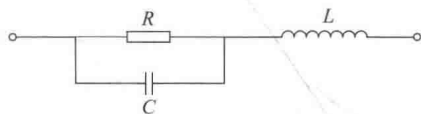


图 2-4 电阻器的等效电路

⑦ 电路中如需通过串联或并联电阻获得所需阻值时,应考虑其额定功率。阻值相同的电阻串联或并联,额定功率等于各个电阻额定功率之和。阻值不同的电阻串联时,额定功率取决于高阻值电阻;阻值不同的电阻并联时,额定功率取决于低阻值电阻,且需计算方可应用。

2.2.2 电位器

(1) 电位器的表示法

电位器用字母 R_p 表示,电路符号如图 2-5 所示。电位器一般有三个端子:1 和 3 是固定端、2 是滑动端,其阻值可以在一定范围内变化。电位器的标称值是两个固定端的电阻值,滑动端可在两固定端之间的电阻体上滑动,使滑动端与固定端之间的电阻值在标称值范围内变化。电

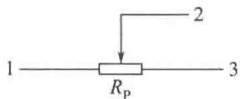


图 2-5 电位器的电路符号

位器常用作可变电阻或用于调节电位。

(2) 电位器的分类

电位器的种类很多，通常可按其材料、结构特点、调节机构运动方式等进行分类。

按电阻材料划分，可分为绕线和薄膜两种电位器。薄膜电位器又分为小型碳膜电位器、合成碳膜电位器、有机实芯电位器、精密合成膜电位器和多圈合成膜电位器等。绕线电位器额定功率大、噪声低、温度稳定性好，但制作成本较高、阻值范围小、分布电容和分布电感大，一般应用于电子仪器中。薄膜电位器的阻值范围宽、分布电容和分布电感小，但噪声较大、额定功率较小，多应用于家用电器中。

按调节机构的运动方式可分为旋转式和滑动式两种电位器。

按阻值的变化规律可分为线性和非线性电位器。

(3) 电位器参数

电位器的参数主要有三项：标称值、额定功率和阻值变化率。

① 标称值。电位器表面所标的阻值为标称值。标称值是按国家规定标准化了的电阻值系列值，不同精度等级的电阻器有不同的阻值系列，见表 2-4 所示。使用时可将表中所列数值乘以 10^n (n 为整数)。例如，“1.1”包括 1.1Ω ， 11Ω ， 110Ω ， $1.1k\Omega$ ， $11k\Omega$ ， $110k\Omega$ 等阻值系列。在电路设计时，计算出的电阻值要尽量选择标称值系列，这样才能选购到所需要的电阻。

表 2-4 电阻器标称值系列

标称阻值系列	精度	精度等级	电阻器标称值
E24	$\pm 5\%$	I	1.0 1.1 1.2 1.3 1.5 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.7 3.0 3.3 3.6 3.9 4.3 4.7 5.1 5.6 6.2 6.8 7.5 8.2 9.1
E12	$\pm 10\%$	II	1.0 1.2 1.5 1.8 2.2 2.7 3.3 3.9 4.7 5.6 6.8 8.2
E6	$\pm 20\%$	III	1.0 2.2 3.3 4.7 6.8

② 额定功率。电位器的额定功率是指两个固定端之间允许耗散的最大功率，滑动头与固定端之间所承受的功率要小于额定功率。线绕电位器额定功率（单位：W）系列为：0.25，0.5，1，2，3，5，10，16，25，40，63，100；非线性绕电位器功率（单位：W）系列为：0.025，0.05，0.1，0.25，0.5，1，2，3 等。

③ 阻值变化规律。电位器的阻值变化规律是指当旋转滑动触点时，阻值随之变化的关系。常用的电位器有直线式（X）、对数式（D）和指数式（Z）。其变化规律如图 2-6 所示。

(4) 电位器使用方法

当电位器用作可调电阻时，连接如图 2-7 所示，这时将 2 和 3 连接，调节点 2 位置，1 和 3 端的电阻值会随 2 点的位置而改变。

当电位器用于调节电位时，连接如图 2-8 所示，输入电压 U_i 加在 1 和 3 的两端，改变点 2 的位置，点 2 的电位就会随着改变，起到调节电位的作用。

(5) 注意事项

- ① 移动滑动端调节电阻时，用力要轻。
- ② 对数式电位器和指数式电位器要先粗调，后细调。

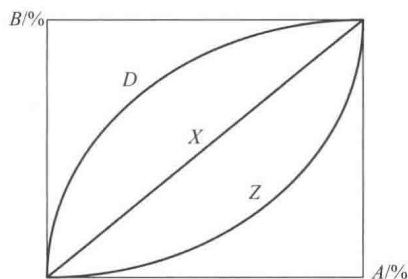


图 2-6 阻值变化规律

A—旋转角度百分比；

B—阻值百分比（以标称阻值为基数）

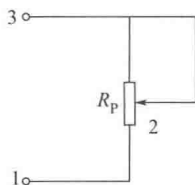


图 2-7 可调电阻

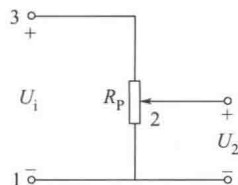


图 2-8 电位器

2.2.3 电容器

(1) 电容的定义

电容器是电工电子电路中常用的器件，它由两个导电极板，中间夹一层绝缘介质构成。当在两个导电极板上加上电压时，电极上就会储存电荷。它是储存电能的器件，主要参数是电容。

电容元件是从实际电容器抽象出来的模型，对于线性非时变的电容，其定义如下

$$C = \frac{q(t)}{u(t)}$$

式中， $q(t)$ 为电容上电荷的瞬时值； $u(t)$ 为电容两端电压的瞬时值。

(2) 电容的符号、单位

电容用字母 C 表示，基本单位是 F（法拉），辅助单位有微法（ μF ， 10^{-6}F ），纳法（ nF ， 10^{-9}F ），皮法（ pF ， 10^{-12}F ）。常用的是微法和皮法。电容的图形符号如图 2-9 所示。

电容器有隔直通交的特点，因此，在电路中通常可完成隔直流、滤波、旁路、信号调谐等功能，在关联参考方向下，其约束关系如下式所示

$$i = C \frac{du(t)}{dt}$$



(a) 电容一般符号



(b) 极性电容

图 2-9 电容的图形符号

上式说明，电容电路中的电流与其上电压大小无关，只与电压的变化率有关，故称电容为动态元件。

(3) 电容器的分类

电容器按照结构可分为固定电容器、可变电容器和微调电容器，按介质材料可分为有机介质、无机介质、气体介质和电解质电容器等。图 2-10 所示的为常见的电容器分类方法。

(4) 电容器的主要参数

电容器的主要参数有标称容量、额定工作电压、绝缘电阻、介质损耗等。

1) 标称容量及精度 标称容量是指电容器两端加上电压后储存电荷的能力。标称容量是电容器外表面所标注的电容量，是标准化了的电容值，其数值同电阻器一样，也采用 E24，E12，E6 标称系列。当标称容量范围在 $0.1 \sim 1\mu\text{F}$ 时，采用 E6 系列。对于标称容量在 $1\mu\text{F}$ 以上的电容器（多为电解电容器），一般采用表 2-5 所示的标称系列值。



图 2-10 电容器的分类

表 2-5 1μF 以上电容器的标称系列值

容量范围	标称系列电容值/μF													
>1μF	1	2	4	4.7	6	8	10	15	20	30	47	50	60	100

2) 额定工作电压 电容器在规定的工作温度范围内长期、可靠地工作所能承受的最高电压为额定工作电压。若工作电压超出这个电压值，电容器就会被击穿损坏。额定工作电压通常指直流电压。常用固定式电容器的直流电压系列值（单位：V）为：1.6，4，6，6.3，10，16，25，32*，40，50*，63，100，125*，160，250，300，400，450*，500，630，1000（有“*”号的只限于电解电容器使用）。电解电容器和体积较大的电容器的额定电压值直接标在电容器的外表面上，体积小的只能根据型号判断。

3) 绝缘电阻及漏电流 电容器的绝缘电阻是指电容器两极之间的电阻，或叫漏电阻。电解电容的漏电流较大，通常给出漏电流参数；其他类型电容器的漏电流很小，用绝缘电阻表示其绝缘性能。绝缘电阻一般应在数百兆欧姆到数千兆欧姆数量级。

4) 介质损耗 介质损耗，是指介质缓慢极化和介质导电所引起的损耗。通常用损耗功率和电容器的无功功率之比，即损耗角的正切值表示

$$\tan\delta=\frac{\text{损耗功率}}{\text{无功功率}}$$

不同介质电容器的 tanδ 值相差很大，一般在 10⁻²~10⁻⁴ 数量级。损耗角大的电容器不适用于高频情况下工作。

(5) 电容器的标注方法

电容器的标注方法有直接标注法和色码法。

1) 直接标注法 直接标注法是用字母或数字将电容器有关的参数标注在电容器表面上。对于体积较大的电容器，可标注材料、标称值、单位、允许误差和额定工作电压，或只标注标称容量和额定工作电压；而对体积较小的电容器，则只标注容量和单位，有时只标注容量

不标注单位，此时当数字大于 1 时单位为皮法（pF），小于 1 时单位为微法（μF）。

电容器主要参数标注的顺序如下。

第一部分，主称，用字母 C 表示电容。

第二部分，用字母表示介质材料，其对应关系见表 2-6。

第三部分，用字母表示特征。

第四部分，用字母或数字表示，包括品种、尺寸代号、温度特征、直流工作电压、标称值、允许误差、标准代号等。

如 CJX—250—0.33—±10%，表示金属化纸介质小型电容器，容量为 0.33μF，允许误差±10%，额定工作电压为 250V。

又如 CD25V47μF，表示额定工作电压为 25V、标称容量为 47μF 的铝电解电容。CL 为聚酯（涤纶）电容器，CB 为聚苯乙烯电容器，CBB 为聚丙烯电容器，CC 为高频瓷介质电容器，CT 为低频瓷介质电容器等。

表 2-6 电容器的介质材料采用的标注字母

字母	介质材料	字母	介质材料	字母	介质材料
A	钽电解	H	纸膜复合	Q	漆膜
B	聚苯乙烯等非极性有机薄膜	I	玻璃釉	T	低频陶瓷
C	高瓷电解	J	金属化纸	V	云母纸
D	铝电解	L	聚酯等极性有机薄膜	Y	云母
E	其他材料电解	N	铌电解	Z	纸
G	合金电解	O	玻璃膜		

用数字标注容量有以下几种方法。

- ① 只标数字，如 4700，300，0.22，0.01。此时指电容的容量是 4700μF，300μF，0.22μF，0.01μF。
- ② 以 n 为单位，如 10n，100n，4n7。他们的容量是 0.01μF，0.1μF，4700pF。
- ③ 用三位数码表示容量大小，单位是皮法（pF），前两位是有效数字，后一位是零的个数。

例如：102，它的容量为 $10 \times 10^2 \text{ pF} = 1000 \text{ pF}$ ，读作 1000pF；

103，它的容量为 $10 \times 10^3 \text{ pF} = 10000 \text{ pF}$ ，读作 0.01μF；

104，它的容量为 100000pF，读作 0.1μF；

332，它的容量为 3300pF，读作 3300pF；

473，它的容量为 47000pF，读作 0.047μF；

第三位数字如果是 9，则乘 10^{-1} ，如 339 表示 $33 \times 10^{-1} \text{ pF} = 3.3 \text{ pF}$ 。

由以上可以总结出，直接数字标注法的电容器，其电容量的一般读数原则是： 10^4 以下的读皮法（pF）， 10^4 以上（含 10^4 ）的读微法（μF）。

2) 色码法 电容器的色码法与电阻器相似，各种色码所表示的有效数字和乘数见表 2-3。

电容器的色标一般有三种颜色，从电容器的顶端向引线方向，依次单位第一位有效数字环、第二位有效数字环、乘数环，单位为皮法（pF）。若两位有效数字的色环是同一种颜色，就涂成一道宽的色环。