

DG

XD

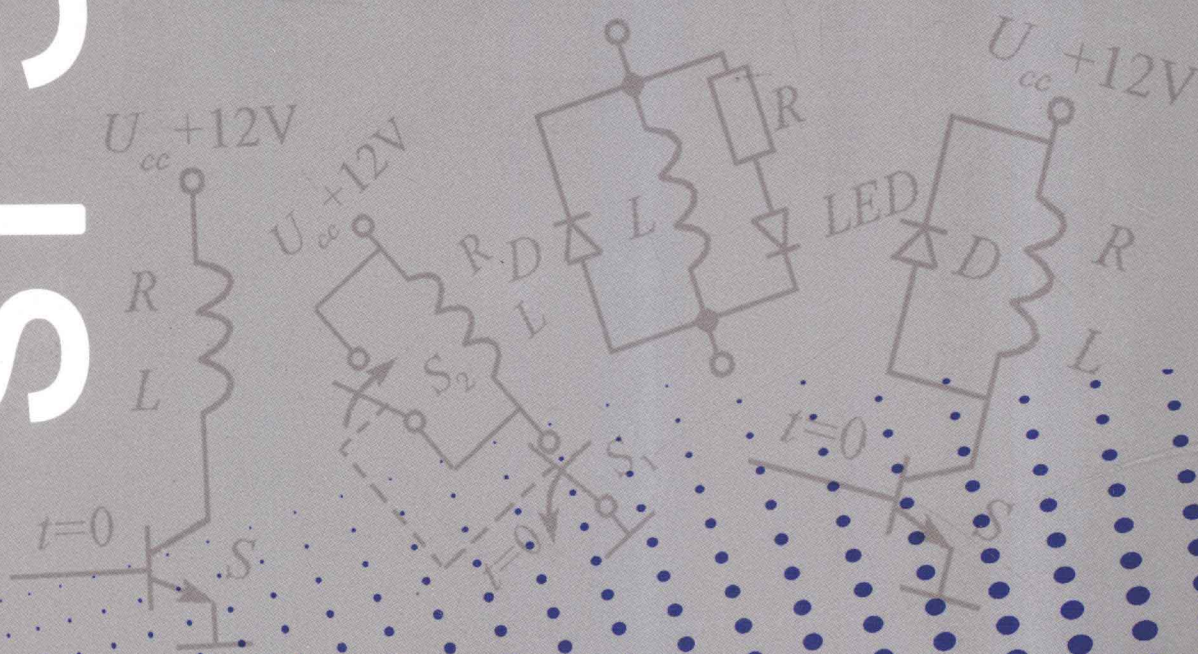
GJS

# 电工学

元增民 编著

电 工 技 术

DIANGONGXUE ( DIANGONG JISHU )

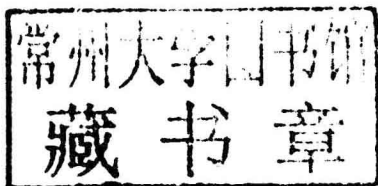


国防科技大学出版社

# 电 工 学

## (电工技术)

元增民 编著



国防科技大学出版社

·长沙·

## 内容提要

本书注意理顺篇章划分及方法的分类,关注现代电工电子技术发展动向,理论结合实际,注重多种方法解决同一个问题,注重让量纲参加到运算过程中。如将常见电路分析方法分为支路电流法、节点电压法、叠加法和等效电源法,将等效电源法分为图解等效电源法和解析等效电源法,最后将解析等效电源法分为代文宁法和诺顿法。如结合 RC 电路暂态过程介绍单片机启动电路,结合 RL 电路暂态过程介绍续流二极管、电子开关保护电路,结合并联谐振讨论功率因数补偿,结合磁路基本知识介绍 CRT 消磁方法和交流线圈损坏原因,结合电流中的电子运动速度的计算讨论铜线代替铅锡保险丝的分析计算,还介绍了无刷直流电动机、电容式吊扇调速器等新知识、新方法、新产品。

### 图书在版编目(CIP)数据

电工学(电工技术)/元增民编著. —长沙:国防科技大学出版社,2011.8  
ISBN 978-7-81099-909-0

I. ①电… II. ①元… III. ①电工技术 ②电工学 IV. ①TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 149190 号

国防科技大学出版社出版发行  
电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:徐飞 责任校对:刘梅

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

\*

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:419千

2011年8月第1版第1次印刷 印数:1-2000册

ISBN 978-7-81099-909-0

定价:35.00元

# 前 言

电工学(电工技术)主要由电路磁路与电机电器等内容组成。目前这类教科书品种数量已经不少,之所以写作本书,主要是考虑目前这类教科书还有很多不足之处,如分类不妥、主次颠倒、引导生硬、内容陈旧等。科学之颠本来没有路,前辈们给我们开辟出了九曲十八弯的科学之路。我们不能坐享其成,我们有责任有义务拉直拓宽科学之路,使其愈加平坦,使我们的后人走起来更顺畅些。做梯应如缓缓慢坡助于攀登,写书要似涓涓细流引人入胜。

为改进教学效果及有利于读者自学,本书采取了以下措施。注意合理分门别类,理顺内容关系;抓住主要矛盾,分清主次关系;介绍流行元件,融进新型电路;注意扬长避短,理论结合实际;量纲数值并用,始终把握脉络。

合理的分门别类好似四两拨千斤,能使读者事半功倍。本书把代文宁法与诺顿法归类于解析等效电源法,又将图解等效电源法(等效变换法)与解析等效电源法归类为等效电源法。又将并联谐振与最佳功率因数补偿结合在一起讨论,节省篇幅,方便学习。

关联假设方向一旦搞错,分析计算就会前功尽弃、铸成大错。关联假设方向是电路磁路分析的难点和重点。科学客观地确定相关参量的关联假设方向,是电路分析的首要任务。目前所称电压、电流参考方向本意是假设方向,但极易误解为基准方向。再加上目前又是关联参考方向又是非关联参考方向的,更容易使人如丈二和尚摸不着头脑。为避免误会,本书改用假设方向及关联假设方向称呼。

本书把根据液气流  $Q$  的假设方向确定液气压  $P$  的关联假设方向的方法引申,根据电流  $I$  假设方向来确定电压  $U$  的关联假设方向,根据电容电荷  $Q$  假设方向确定电容电压  $U$  的关联假设方向,根据电容电荷增加率  $dq/dt$  确定电容电流  $I$  的关联假设方向,根据电感电流  $I$  假设方向确定感应电压  $u_L = L(di/dt)$  的关联假设方向,根据磁通  $\Phi$  假设方向依次确定线圈感应电流  $I$  及感应电压  $U$  的假设方向。

本书注意介绍新型元件,如贴片电阻、电感、电容等,新型电路如单片机启动电路、续流二极管、电子开关保护电路、反激式开关稳压电源及正激式开关稳压电源、CRT 消磁电路、无刷直流电动机及其控制电路、电容式吊扇调速器等,以及新型磁路,如环形磁芯、C 形铁芯、R 型铁芯、立体三柱卷铁芯等。

本书讨论电路分析计算方法时注意扬长避短,针对双节点电路讨论节点电压法,介绍完支线电流法即紧接着介绍高效的网孔电流法并资对比,还讨论了暗箱迭加法、交流磁路新分析方法、异步电动机旋转磁场电流排分析方法等。

本书注重分析计算步骤,注重参数量纲及其换算。把电路及磁路所有参数的量纲都分解表达为伏特(V)、安培(A)、欧姆( $\Omega$ )、秒(s)、米(m)等基本量纲的组合,让量纲参与到数值运算过程中,随着数值运算自然得出结果的单位,使人口服心服、融会贯通。

作者注意到 RLC 电路趋向于并联谐振时线路总电流减小,感性负载并联功率因数补偿电容时线路总电流亦减小。功率因数补偿就是趋向于并联谐振,功率因数全补偿就是并联谐振,功率因数全补偿并不需要很大的电容,因此全补偿成本并不高。由此本书积极倡导功率因数全补偿。

作者注重理论与实践相结合。如结合 RC 电路暂态过程理论解释计算机(单片机)复位启动电路工作原理,结合自感系数计算方法介绍电感式传感器分析计算,结合多线圈电感暂态过程分析讲解反激式以及正激式开关电源工作原理,结合磁路基本知识介绍交流继电器线圈损坏原因,并现场演示 CRT 消磁方法。

作者还注意到磁场能量不能突变的本质是磁通不能突变。单线圈电感电流不能突变是磁通不能突变的连锁反应。多线圈电感线圈电流可以转移,实际表现为既可以瞬间停止,也可以即刻产生。并用多线圈电感模型很好地解释了开关稳压电源工作原理。

本书倡导一题多解的思路和做法。用多种方法解决同一个问题,可以巩固概念、熟悉方法、提高分析解决问题的能力。本书不仅沿用磁感应强度  $B$  的第二个名字磁通密度,而且给磁场强度  $H$  起了第二个名字磁动势线密度。本书在磁路分析中注意实事求是,抓住主要矛盾。漏磁较小时,注意忽略漏磁;磁芯磁阻远远小于空气隙磁阻时,注意适时忽略磁芯磁阻。

因课时少或者教学层次等原因,本书内容打\*号者可不编入教学计划。

本书前身作为讲义自 2007 年就开始在长沙大学机电系 05 级机制 1~8 班等班级陆续使用,2010 年秋天又为长沙大学土木系 08 级土建 1、2 班及建筑 1、2 班使用。作者 2006 年在国防科技大学出版社出版了《单片机原理与应用基础》,2009 年在中国电力出版社出版了《模拟电子技术》。身心倍感疲惫,本来短期内不打算再写书,但 2010 年底所任教长沙大学土木系四个班学员极力建议作者将电工技术讲义出版,土木系为学生着想而全力支持,适逢湖南信息学院又给予大力支持。主观上多方面的期待和支持,客观上电工技术讲义已经多年使用、多次修改、日趋充实,使得本书出版呈箭在弦上不得不发之势。各种因素促使作者再拼一次。

徐建英老师等提出了许多宝贵建议,长沙大学、湖南信息学院及国防科技大学出版社给予作者大力支持,在此一并表示诚挚感谢。教材建设是一项浩大的系统工程。由于作者水平和见识所限,本书难免存在这样那样的不足之处,衷心希望大家多多指正,以使本书不断完善,更好地为读者服务。意见和建议请发到作者电子邮箱 yzm@ccsu.cn 或 yzmhb@126.com。

元增民

2011 年仲夏于长沙浏阳河畔

# 电路磁路常用符号

由于拉丁字母和希腊字母加起来才只有 50 多个，其中大写字母还多有重复，而电路磁路内容很多，故一个字母多用的情况很多见，甚至一个字母的大小写各自表达截然不同的意思。

## 1. 专用符号

$\pi$  圆周率  $\pi = 3.14159$

$U$  电压

$I$  电流

$R$  电阻

$R_m$  磁阻

$L$  电感

$\eta$  效率

$\beta$  晶体管电流放大倍数

## 2. 多用符号

$A$  (A) 1) 放大倍数; 2) 电流单位: 安培 (安)

$Q$  (Q) 1) 品质因数; 2) 电量; 3) 无功功率

$C$  (C) 1) 电容 (荷压比) 符号; 2) 电量单位: 库伦

$H$  (H) 1) 磁动势线密度 (磁场强度) 符号; 2) 电感单位: 亨利 (亨)

$F$  (F) 1) 磁动势  $F = NI$ ; 2) 电容单位: 法拉 (法)

$V$  (V) 1) 速度; 2) 电压单位: 伏特 (伏)

$T$  (T) 1) 周期; 2) 扭矩; 3) 磁通密度单位: 特斯拉 (特)

$\mu$  ( $\mu$ ) 1) 磁导率; 2) 前缀, 倍率: 微、 $10^{-6}$

$j$  1) 电流密度; 2) 虚数前缀符号

## 3. 大小写含义不一定相同的符号

通常物理量大写符号  $U$ 、 $I$ 、 $Q$ 、 $V$ 、 $E$ 、 $\Phi$  代表直流值, 小写符号代表瞬时值; 但是还有很多小写字母与大写字母以及它们的正体和斜体, 各自分别代表截然不同的意思。

$E$ : 电压源电动势;  $e$ : 1) 自然对数底  $e = 2.71828$ , 2) 电子电量  $e = 1.602 \times 10^{-19}$  库伦 (C)

$F$ : 磁动势  $F = NI$ ;  $F$ : 电容单位: 法拉;  $f$ : 频率

$G$ : 电导;  $G$ : 前缀, 倍率: 吉、 $10^9$ ;  $g_m$ : FET 跨导

$H$ : 磁场强度 (磁动势线密度) 符号;  $H$ : 电感单位: 亨;  $h$ : 小时单位

$K$ : 绝对温度;  $k$ : 前缀, 倍率: 千、 $10^3$

$M$ : 前缀, 倍率: 兆、 $10^6$ ;  $m$  独立使用: 米;  $m$  前缀, 倍率: 毫 (千分之一)、 $10^{-3}$ ;  $m$  下标: 1) 幅度, 例  $U_m$  表示交流电压幅度; 2) 磁阻  $R_m$

$N$ : 匝数;  $N$ : 力单位: 牛;  $n$ : 匝数;  $n$ : 前缀: 纳、 $10^{-9}$

$S$ : 1) 面积; 2) 视在功率;  $S$ : 电导单位: 西门子 (西)、 $S = \Omega^{-1}$ ;  $s$ : 秒

$T$ : 1) 周期; 2) 扭矩;  $T$ : 磁通密度单位: 特斯拉;  $t$ : 时间;  $\tau$ : 时间常数

$\Delta$ : 前缀, 绝对变化量;  $\delta$  前缀, 相对变化量

$\Omega$ : 电阻单位;  $\omega$ : 角频率, 其单位为  $\text{rad/s}$ ,  $\omega = 2\pi f$

$\Phi$ : 磁通;  $\varphi$ : 通瞬时值或角度

字母符号数量有限, 重复表达不可避免。除了以上所述之外, 实际应用时应结合上下文具体理解。

# 目 录

## 前 言

## 电路磁路常用符号

## 第 1 章 电路基础知识

1.1 电路基本定律及参数量纲 .....	( 2 )
1.1.1 元件参数、单位及其表达方法 .....	( 2 )
1.1.2 电路基本定律及关系 .....	( 6 )
1.1.3 电路参数的量纲及其假设方向 .....	( 9 )
1.1.4 导线中电子的运动速度 .....	( 11 )
1.2 电路组成及基本特性 .....	( 14 )
1.2.1 电压源特性 .....	( 14 )
1.2.2 电流源特性 .....	( 17 )
1.2.3 电源的连接与电路的三种基本工作状态 .....	( 18 )
1.3 元件串并联及星—三角连接 .....	( 21 )
1.3.1 电阻串并联及电压电流的测量 .....	( 21 )
1.3.2 电阻 Y- $\Delta$ 连接及等效转换 * .....	( 24 )
1.4 电源与元器件的额定参数 .....	( 28 )
习题一 .....	( 32 )

## 第 2 章 电路分析方法

2.1 节点电压法 .....	( 34 )
2.1.1 节点电压计算公式 .....	( 34 )
2.1.2 含有电流源的双节点电路 .....	( 36 )
2.1.3 电路形式变换 .....	( 37 )



2.2	支线电流法与网孔电流法 .....	(39)
2.3	叠加原理 .....	(43)
2.3.1	叠加法 .....	(43)
2.3.2	暗箱叠加 .....	(46)
2.4	图解等效电源法 .....	(48)
2.4.1	电压源与电流源的等效变换 .....	(49)
2.4.2	图解等效电源法(等效变换法) .....	(51)
2.5	解析等效电源法——代文宁法与诺顿法 .....	(54)
2.5.1	代文宁法 .....	(55)
2.5.2	诺顿法 .....	(57)
2.5.3	等效电源法解题步骤及技巧 .....	(59)
2.6	电路分析方法汇总及其对比 * .....	(61)
	习题二 .....	(69)

### 第3章 直流电路暂态过程

3.1	暂态过程的三要素分析方法 .....	(71)
3.1.1	暂态过程概念与换路定则 .....	(71)
3.1.2	RC 电路的过渡规律 .....	(72)
3.2	多电阻 RC 电路暂态过程 .....	(79)
3.2.1	多电阻 RC 电路充放电 .....	(79)
3.2.2	电流源作用下的 RC 电路充放电 .....	(81)
3.3	RL 电路暂态过程与开关保护 .....	(83)
3.3.1	RL 电路电流从 0 开始过渡(零状态响应) .....	(83)
3.3.2	RL 电路电流平稳衰减到 0- 开关保护电路(零输入响应) .....	(84)
3.3.3	双线圈 RL 电路过渡过程——开关电源工作原理 * .....	(87)
3.3.4	暂态过程分析计算要点 .....	(90)
3.4	微分电路与积分电路 * .....	(93)
3.5	RC 电路暂态过程在单片机启动中的应用 * .....	(97)
3.6	巧用节点电压法等进行暂态分析 * .....	(100)
	习题三 .....	(104)

### 第4章 正弦交流电路

4.1	正弦交流电基础知识 .....	(107)
4.1.1	正弦交流电的瞬时值、有效值及相量表达 .....	(107)
4.1.2	RLC 三大电子元件的欧姆定律 .....	(111)

4.2 基本正弦交流电路 .....	(115)
4.2.1 RL 串联电路 .....	(115)
4.2.2 RC 串联电路 .....	(116)
4.2.3 RLC 串联电路与串联谐振 .....	(118)
4.3 RLC 并联谐振与功率因数补偿 .....	(121)
4.3.1 视在功率、有功功率及功率因数 .....	(121)
4.3.2 RLC 并联谐振与功率因数补偿 .....	(122)
4.3.3 正弦交流电路中的勾股弦关系 .....	(128)
4.4 RC 滤波电路 .....	(128)
习题四 .....	(132)
<b>第 5 章 三相电路</b>	
5.1 三相电源与三相负载 .....	(134)
5.1.1 三相星形电源 .....	(134)
5.1.2 三相星形负载与三角形负载 .....	(137)
5.2 三相功率 .....	(142)
5.3 三相负载功率因数补偿 * .....	(148)
习题五 .....	(149)
<b>第 6 章 磁路基础</b>	
6.1 直流磁路 .....	(151)
6.1.1 磁路基本知识 .....	(151)
6.1.2 磁路计算 .....	(155)
6.2 交流磁路 .....	(160)
6.2.1 涡流、磁滞与铁损(CRT 消磁) .....	(160)
6.2.2 交流磁路分析方法 .....	(162)
6.3 变压器 .....	(166)
6.3.1 变压器基本构造 .....	(167)
6.3.2 变压器工作原理 .....	(169)
习题六 .....	(175)
<b>第 7 章 直流电动机</b>	
7.1 直流电动机工作原理与构造 .....	(176)
7.2 直流电动机基本参数及其关系 * .....	(180)
7.2.1 发电系数与发电常数 .....	(180)
7.2.2 力矩系数与力矩常数 .....	(182)

7.2.3 发电系数与力矩系数的关系 .....	(183)
7.3 直流电动机机械特性及使用 .....	(185)
7.4 无刷直流电动机 .....	(189)
习题七 .....	(196)
<b>第 8 章 交流电动机</b>	
8.1 交流电动机工作原理 .....	(197)
8.1.1 交流电动机模型 .....	(197)
8.1.2 旋转磁场技术指标 * .....	(201)
8.2 三相异步电动机基本参数及其机械特性 .....	(205)
8.2.1 三相异步电动机基本参数及其关系 .....	(205)
8.2.2 三相异步电动机机械特性 .....	(207)
8.3 单相交流电动机 .....	(209)
8.4 三相异步电动机的使用及选用 .....	(214)
8.4.1 启动、运转、调速及制动 .....	(214)
8.4.2 异步电动机的选用 .....	(217)
习题八 .....	(218)
<b>第 9 章 继电器接触器控制系统</b>	
9.1 常用低压控制电器 .....	(219)
9.1.1 开关电器的一些基本概念 .....	(219)
9.1.2 手动电器 .....	(220)
9.1.3 自动电器 .....	(221)
9.1.4 自动保护电器 .....	(222)
9.2 基本控制单元电路 .....	(223)
9.2.1 自保单元与互锁单元 .....	(223)
9.2.2 时间控制电路 .....	(224)
9.2.3 顺序控制电路 .....	(226)
9.3 典型控制电路 .....	(228)
<b>第 10 章 发配电及安全用电</b>	
10.1 发电、输电与配电 .....	(230)
10.2 安全用电 .....	(234)
10.2.1 电对人体的危害 .....	(234)
10.2.2 触电方式及保护措施 .....	(236)

**第 11 章 电工技术实验**

实验一 验证基尔霍夫定律·····	(239)
实验二 验证代文宁定律·····	(241)
实验三 积分电路实验·····	(242)
实验四 日光灯电路功率因数的改善·····	(244)
实验五 异步电动机星—三角降压启动综合实验·····	(247)
<b>附一:贴片元器件</b> ·····	(250)
<b>附二:铜导线及保险丝的选用和代换</b> ·····	(253)
<b>复习题</b> ·····	(256)
<b>部分习题答案</b> ·····	(260)
<b>参考文献</b> ·····	(266)

# 第 1 章 电路基础知识

世界上最早的电路是以闪电为电源、以空气、土壤、植物等为负载回路组成的自然电路。自然电路很难预测、很难控制,因此给社会造成很多灾难,更谈不上为人类服务。

事物都是一分为二的。人们在看到闪电危害性的同时,也看到了闪电中所蕴含能量的价值。科学家对电学的研究正是从对闪电与摩擦生电现象的等同性等规律的认识开始的。

1785 年法国科学家库仑(Charlse - Augustin de Coulomb, 1736—1806)发现电荷间的相互作用力的规律——库仑定律。后人以库仑(C)作为电荷的基本单位。

1800 年法国科学家伏特(Alessandro Volta, 1745—1827)发明化学电池,为人们研究电路提供了必需的原始电源。1881 年国际电工委员会(IEC)批准以伏特(V)作为电压的基本单位。

1820 年丹麦科学家奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777—1851)发现电流磁效应,奠定了现代电磁学的基础。

1826 年德国物理学家欧姆(Georg Simon Ohm, 1787—1854)发现电压、电流与电阻关系的定律。先后在英国及德国获得承认,最后命名为欧姆定律。后人把欧姆( $\Omega$ )作为电阻单位。

1827 年法国科学家安培(André - Marie Ampère, 1775—1836)发现载流线圈与磁铁的作用相似。后人以安培(A)作为电流单位。

1831 年英国科学家法拉第(Michael Faraday, 1791—1867)发现电磁感应现象,奠定了现代发电技术、电源大功率化和电能广泛应用的技术基础。后人以法拉(F)作为电容单位。

1833 年俄国科学家楞次(Эмилий Христианович Ленц, 1804—1865)发现确定感应电流方向的楞次定则。

1847 年德国科学家基尔霍夫(Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887)就读大学时提出著名的节点电流定律和回路电压定律,后来命名为基尔霍夫第一定律和第二定律(KCL 及 KVL)。

1864 年英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)建立电磁场及电磁波理论,为现代无线电技术奠定了理论基础。

1879 年美国科学家爱迪生(Thomas Alva Edison, 1847—1931)发明直流供电和电灯。

1888 年德国科学家赫兹(Heinrich R. Hertz, 1857—1894)用实验证实了麦克斯韦电磁波理论。

1883 年法国电报工程师代文宁(M. Leon Thevenin, 1857—1926)发现把一个复杂电路

等效简化为一个电压源的方法。后人称为代文宁定理。

1889年南斯拉夫科学家特斯拉(Никола Тесла, 1856—1943)发明交流电动机及交流供电体系。后人以特(T)作为磁感应强度的基本单位。

1893年德国科学家、IEEE(电气与电子工程师协会)前主席斯坦梅茨(Charles Proteus Steinmetz, 1865—1923)创立相量法描述交流电,为后人提供了高效的分析计算方法。

1926年美国贝尔实验室工程师诺顿(E. L. Norton)发现把一个复杂电路等效简化为一个电流源的方法。后人称为诺顿定理。诺顿定理与代文宁定理互为对偶。

经过二百多年来几代科学家的不懈努力,最终证明了闪电、摩擦电、伏打电、温差电、动物电及电磁感应的同一性,逐渐形成了电路理论。电路理论不仅是电子学、计算机科学、信息科学等的基础,而且可以直接为工农业生产和人民生活服务。

## 1.1 电路基本定律及参数量纲

从微观层次看,组成物质的原子之间是有缝隙的。电子质量大约只有原子的十万分之一。电子在电动势作用下,在原子之间的缝隙中定向穿梭运动,就形成电流,使物质显示电性。

### 1.1.1 元件参数、单位及其表达方法

元件通常指电阻、电感、电容及其派生的组合体,电阻、电感、电容称为三大电子元件,变压器、电动机、发电机等属于派生元件。器件包括真空电子管和半导体器件。

半导体器件通常指晶体管及其派生的组合体,半导体器件包括晶体二极管、三极管(BJT)、场效应管(FET)。集成电路(IC)由基本器件和元件组成,常认为IC是派生的半导体器件。

元件参数表示方法:直标法、数字法、色标法。

直标法:将数字及其单位直接印刷在元件表面,如字样10k代表10kΩ电阻。

数字法:将两位或三位有效数字加一位指数印刷在元件表面,但省略单位。

色标法:用颜色代表两位或三位有效数字加一位指数,亦省略单位。

数字法及色标法的隐含单位:电阻欧姆(Ω),电感微亨(μH),电容皮法(pF)。

## 1. 电阻及其标称阻值

### 1) 电阻概念及标称阻值系列

电阻是阻碍电流通过的物理量。电流流过电阻时会发热,汽车后窗玻璃除霜器就是利用附着在玻璃上的格栅电阻通过电流时发热来化霜的。

电阻率 $\rho$ 、长度 $l$ 、横截面积 $S$ 的电阻的阻值为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1.1)$$

电阻率  $\rho$  单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ 、长度  $l$  单位为  $\text{m}$ 、横截面积  $S$  为  $\text{m}^2$  时,电阻  $R$  单位为  $\Omega$ 。

20℃时铜电阻率  $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} = 0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ,铝电阻率约是铜的 1.6 倍。温度上升时金属电阻率少许变大。

电阻率的倒数叫做电导率,电阻率  $\rho$  单位为  $\Omega \cdot \text{m}$  时,电导率单位为  $\text{S}/\text{m}$ (西门子/米)。20℃时铜电阻率  $\rho = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ,折合电导率约为  $5.7 \times 10^7 \text{S}/\text{m}$ 。

线性电阻指阻值与电流无关,即阻值不变的电阻。电阻值不变时,电阻两端电压与电流呈线性关系。常用的线绕电阻、金属膜电阻和碳膜电阻的阻值在其消耗功率不超过额定范围时,阻值基本不变,因此常见电阻都可认为是线性电阻。电阻值实际是电压与电流的比值,简称压流比。电压、电流与电阻的关系是由欧姆发现的,所以用欧姆( $\Omega$ )作为电阻的基本单位。将每 1A 电流产生 1V 电压的电阻定义为 1 $\Omega$ 。

$$1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$$

通常  $\Omega$  单位比较小。常用电阻单位还有千欧姆( $\text{k}\Omega$ )和兆欧姆( $\text{M}\Omega$ )两种

$$1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$$

$$1\text{M}\Omega = 10^3\text{k}\Omega = 10^6\Omega$$

在表示电源内阻等情况下, $\Omega$  单位又显得比较大,故电阻单位还有毫欧姆( $\text{m}\Omega$ )等。

$$1\text{m}\Omega = 10^{-3}\Omega$$

电阻的倒数叫做电导。用符号  $G$  表示电导

$$G = \frac{1}{R}$$

电导  $G$  的单位是西门子(Siemens),简称西(S),以纪念德国工程学家西门子(Siemens)。

$$1\text{S} = 1\Omega^{-1}$$

为生产管理及使用方便,规定了电阻标称阻值。电阻标称阻值由等比数列组成。

电阻标称阻值有 E6、E12、E24 及 E48 系列,常用 E24 系列。

各系列相邻规格电阻比值如下:

E6 系列:  $\sqrt[6]{10} = 1.5$ ; E12 系列:  $\sqrt[12]{10} = 1.2$ ; E24 系列:  $\sqrt[24]{10} = 1.1$ ; E48 系列:  $\sqrt[48]{10} = 1.05$ 。

各系列中相邻规格电阻的有效值如下:

E6 系列: 10, 15, 22, 33, 47, 68;

E12 系列: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82;

例如, E6 系列 10 $\text{k}\Omega$  数量级电阻有 10 $\text{k}\Omega$ 、15 $\text{k}\Omega$ 、22 $\text{k}\Omega$ 、33 $\text{k}\Omega$ 、47 $\text{k}\Omega$ 、68 $\text{k}\Omega$ 。

## 2) 电阻阻值的数字标识与色环标识

电阻阻值有直接数字标识、数字标识与色环标识。

电阻阻值采用数字标识法和色环标识法的隐含单位为其基本单位  $\Omega$ 。为方便自动化安装,除了大功率电阻还用直接数字标识法之外,小功率电阻阻值通常以色环标识或数字标识。

电阻阻值色环标志法:

十大颜色及代表数值:黑 0,棕 1,红 2,橙 3,黄 4,绿 5,蓝 6,紫 7,灰 8,白 9。

精度:金 $\pm 5\%$ ,银 $\pm 10\%$ 。

金色、银色还可作指数环。作指数环的金色代表-1、银色代表-2。

十大颜色以七色彩虹为基础。赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种彩虹色中,青色常人难以辨认,故弃之不用。在剩下赤、橙、黄、绿、蓝、紫六色前面加上黑、棕色,后边加上灰、白色,即形成表示0、1、2、3、4、5、6、7、8、9的十大颜色黑、棕、赤、橙、黄、绿、蓝、紫、灰、白。黑、棕、灰、白严格讲虽然不算什么颜色,但因黑白分明,棕是常见的植物色,灰是常见的纺织品颜色,介于黑白之间,均易于辨认,依然纳入十大颜色之中。

色环电阻分四环和五环两种。四环电阻较易识别。实验室采购应优先考虑四环电阻。

四环电阻的前两环为有效数字环,第三环为指数环,即0的个数,两位有效数字与10的幂的乘积即是电阻阻值,单位为 $\Omega$ ,第四道为精度环,代表阻值允差。

五环电阻的前三环为有效数字环,第四环为指数环,即0的个数,三位有效数字与10的幂的乘积即是电阻阻值,单位为 $\Omega$ ,第五道为精度环,代表阻值允差。

电阻一端的金色环或银色环肯定代表精度。确认色环电阻阻值时,应当从与精度环相反的那一端开始读起。例如,色彩为棕黑橙金的四环电阻,从与代表精度的金色环相反的棕色环读起,棕黑代表数字10,橙代表 $10^3$ ,标称阻值为 $R = 10 \times 10^3 \Omega = 10\text{k}\Omega$ ,精度 $\pm 5\%$ ,其实际阻值应在 $9.5\text{k}\Omega \sim 10.5\text{k}\Omega$ 之内。

电阻阻值色环标志法的优点是电阻在线路板上卧式安装时没有角度问题,无论如何安装都不影响观察阻值,有利于自动化大批量生产。

## 2. 电容及其荷压比(容量)的标称值

正像电阻电压与电流比值称为压流比一样,电容贮存电荷量 $Q$ 与其端电压 $U$ 的比值称为荷压比,即单位电压下所存贮的电荷量,俗称容量,符号 $C$ 。

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.1.2)$$

极板面积 $S$ 、间距 $d$ 、绝缘介质介电常数 $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ 的电容的电荷电压比为

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.1.3)$$

真空的介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ,空气与真空的介电常数近似相等, $\epsilon_r = 1$ 。

极板面积 $1\text{cm}^2$ 、间距 $1\text{mm}$ 的空气电容的荷压比为 $C = 8.85\text{pF/m} \times 1 \times 10^{-4} \text{m}^2 / (1 \times 10^{-3} \text{m}) \approx 1\text{pF}$ 。

云母相对介电常数 $\epsilon_r = 7$ 。该电容极板之间塞上云母片后,荷压比即增为大约 $7\text{pF}$ 。

水桶能盛水,电容能贮存电荷。水桶盛水,能产生一个与盛水量成正比的水压。电容贮存电荷,能产生一个与所存电荷量成正比的电压。电容与水桶有很多相似之处,见表1.1.1。

人们使用水桶时,所关心的往往是水量而不是水压;进行电容分析计算时正好相反,所关心的往往是电压而不是电荷量。



表 1.1.1 电容与水桶的比较

	水桶	电容
基本关系	$q = s \cdot h = \frac{s}{\rho g} p$	$q = C \cdot u$
参数对比	水量 $q$	电荷量 $q$
	水压 $p$	电压 $u$
	容压比 $= \frac{s}{\rho g}$	荷压比 $C = \epsilon \frac{s}{d}$
	额定容量	额定耐压

电容电荷的变化率就是电流。从(1.1.2)式求得电荷  $q = Cu$  微分即得电容电流计算公式

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1.1.4)$$

电容荷压比<sup>①</sup> 基本单位为法拉(F),简称法,是为纪念英国电学家法拉第而命名的。电容在 1V 电压下储存电荷量是 1 库仑,称这个电容荷压比为 1 法拉(F)。

$$1\text{F} = 1\text{C}/\text{V} = 1\text{A} \cdot \text{s}/\text{V} = 1\text{s}/\Omega$$

电容荷压比小,说明它充上一点点电荷就产生很大的电压,就像细管子,灌进一点点水就充满很长一段,就能产生很大的水压;电容荷压比大即压荷比小,说明它充上很多电荷了,但产生的电压还是很小。就像一个大水槽,灌了很多水了,水还是很浅,水压也很小。

电荷的基本单位库伦及电容荷压比的基本单位法拉都嫌大,实际很难找到 1 法拉的电容。电容荷压比常用单位为微法( $\mu\text{F}$ )、纳法(nF)和皮法(pF),其中 pF 为隐含单位。图纸上或电容实体上标注的荷压比数字若无单位,则应理解为 pF。

电容单位皮法(pF)、纳法(nF)、微法( $\mu\text{F}$ )与法拉(F)之间的关系为

$$1\text{pF} = 10^{-6}\mu\text{F} = 10^{-12}\text{F}$$

$$1\text{nF} = 10^{-3}\mu\text{F} = 10^{-9}\text{F}$$

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$$

电容荷压比有直接标注法和三位数字标注法。电解电容采用直接标注法,而无极性电容常采用三位数字标注法。采用三位数字标注法的电容荷压比隐含单位为皮法(pF)。

104、223 都属于三位数字标注法。104 代表  $10 \times 10^4 \text{pF}$ ,223 代表  $22 \times 10^3 \text{pF}$ 。

电容标称值也符合 E6、E12 或 E24 系列值。

电容标称荷压比与其额定电压的标注示例:470 $\mu\text{F}$ /50V。

电容分为无极性电容和有极性电容。按所用材料,电容种类更多。有极性电容也称为电解电容。电解电容分为铝电解电容和钽电解电容。钽电解电容具有无电解液及耐高温等优点。

<sup>①</sup> 电容主参数俗称“容量”,易使人误解为极限电荷量,于是近来有人改称“容值”。但“容值”与“容量”其实没有什么区别,最清晰易用的电容主参数名字应当是“荷压比”或“容压比”。