



高等学校 规划教材
电子信息类

阻容元件及其片式化技术

金同寿



东南大学出版社

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办会商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材按原电子工业部的《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子材料与元器件专业教学指导委员会编审并推荐出版。本教材由上海大学金同寿担任主编，电子科技大学曲喜新主审，责编委李言荣。

本教材主要阐述阻容元件及其片式化技术，参考学时为 80。全书分三篇共 6 章，其主要内容有阻容元件的性能、参数测量和可靠性、设计方法、工艺基础、结构和工艺特点、表面安装技术与片式阻容元件等，适于电子科学与技术专业本、专科学生用作教材，亦可作为电子信息工程类专业相应课程的教材和供从事阻容元件生产、应用开发和电子工程的工程技术人员阅读参考。

教材编写中，注意到本专业从业人员应具备的知识结构和从业特征，并兼顾非本专业教学班的需要，内容比较广泛。由于工程技术岗位接触到的大多是基本原理结合工程环境的应用和拓展，且高新技术的日新月异远非教材能够包揽，所以高等工程类专业学生应掌握本专业足够广泛的浅显原理，进而融会贯通、灵活应用。本书在内容安排上避免基本公式的推演，力求使学生对阻容元件的基本理论与技术有广泛的了解和细节上的切实掌握，使之能适应从事阻容元件设计和产品工艺的需要。

使用本教材应考虑到其编写宗旨是以阐明知识点为手段，通过教学帮助学生学会串联，以培养他们成为胜任从事和指导工程实践的工程师。所以，在教学中应注意与先行课程的呼应，避免内容重复，更希望简洁明了地阐明知识点而决不用冗长的叙述去追溯它的渊源。把深入的探讨让给人们根据工作需要和通过专著或专题论述去进一步研究。

本教材第 2 章由王春涛编写、第 3 章由闵嘉华编写、第 4 章由金承钰编写，金同寿编写其它各章并负责全书统稿。天津大学谢道华教授、福州大学林吉申副教授，为本书的构思和内容取舍提出了许多宝贵意见。本书编写中，主要参考了天津大学、西安交通大学和原成都电讯工程学院、上海科技大学、上海科技高等专科学校等院校编写的有关“阻容元件”的教材和讲义，采集了最新出版的有关“表面安装技术”书刊中的技术内容。杨秀芳、程永年同志为书稿整理和校对做了大量工作，在此一并表示诚挚感谢。

由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2000 年 1 月

目 录

第一篇 阻容元件的性能与测试

1 阻容元件的性能

1.1 阻容元件的分类与命名	(1)
1.2 阻容元件的标称值和允差	(2)
1.3 阻容元件参数的稳定性	(2)
1.4 电容器的绝缘电阻和电阻器的杂散电容	(5)
1.5 阻容元件的荷电性、阻流性及其高频性状	(10)
1.6 阻容元件的损耗	(17)
1.7 阻容元件的电感	(22)
1.8 阻容元件的等效电路和频率特性	(24)
1.9 阻容元件的参数非线性	(29)
1.10 阻容元件的噪声	(32)
1.11 阻容元件的热性能和耐电特性	(33)
1.12 阻容元件的比特性与产品小型化	(46)
1.13 电解电容器的性能	(49)
1.14 敏感电阻器及其性能	(54)
1.15 电位器的性能	(63)
1.16 可变电容器的性能	(69)

2 阻容元件测量和可靠性

2.1 电阻值、电容器绝缘电阻的测量	(75)
2.2 电容量的测量	(79)
2.3 电阻值和电容量的直读式测量和误差分选	(81)
2.4 阻容元件电感的测量原理	(82)
2.5 电容器损耗角正切值的测量原理	(85)
2.6 电容器容量温度系数的测量原理	(85)
2.7 电容器吸收系数的测量原理	(86)
2.8 耐压试验	(87)
2.9 电阻器电流噪声的测试原理	(88)
2.10 电阻器非线性畸变的测量原理	(89)
2.11 电位器低电平接触电阻的测试原理	(90)
2.12 电位器的动噪声、平滑性、等效噪声电阻的测试原理	(91)
2.13 多联电位器同步误差的测试	(91)

2.14 电子整机的可靠性与元件可靠性	(92)
2.15 阻容元件失效机理浅析	(95)

第二篇 阻容元件的设计与工艺

3 阻容元件的设计方法

3.1 阻容元件设计的依据和内容	(97)
3.2 电阻体的结构和尺寸设计	(98)
3.3 电容器的结构和尺寸设计	(101)
3.4 电阻器电感的估算	(112)
3.5 电容器电感的估算	(113)
3.6 阻容元件引出线(片)的电感	(115)
3.7 降低阻容元件电感的措施	(117)
3.8 阻容元件参数的温度系数	(118)
3.9 电容器损耗与极板有效电阻	(120)
3.10 电容器的热设计	(125)
3.11 阻容元件外部结构的选用	(129)
3.12 机电类阻容元件的设计	(130)

4 阻容元件工艺基础

4.1 元件瓷坯的成型原理	(136)
4.2 丝网漏印技术基础	(137)
4.3 液相与固相间的润湿	(140)
4.4 极板的烧渗	(141)
4.5 真空蒸发原理	(144)
4.6 阴极溅射原理	(150)
4.7 化学沉积原理	(153)
4.8 金属氧化物电阻膜的形成	(155)
4.9 热分解碳电阻膜的成膜原理	(156)
4.10 电容器的浸渍	(157)
4.11 阳极铝箔的退火与腐蚀	(159)
4.12 电解电容器的阳极氧化	(161)
4.13 电阻器生产的通用工艺	(163)
4.14 电容器生产的通用工艺	(171)

第三篇 阻容元件及其片式化

5 阻容元件的结构和工艺特点

5.1 合成型电阻器及其工艺要点	(183)
5.2 薄膜型电阻器及其工艺要点	(192)
5.3 合金型电阻器工艺要点	(200)
5.4 精密型电阻器和新型电阻器	(203)
5.5 电位器的加工特征	(206)
5.6 非接触型电位器的结构与制作原理	(214)
5.7 瓷介电容器及其工艺特征	(215)
5.8 独石型瓷介电容器和半导瓷电容器	(223)
5.9 云母电容器的结构特征与工艺特点	(225)
5.10 有机薄膜电容器的结构和工艺特点	(228)
5.11 电解电容器的工艺特点	(238)
5.12 可变电容器的加工特征	(247)

6 表面安装技术与片式阻容元件

6.1 表面安装技术概论	(253)
6.2 表面安装五要素	(256)
6.3 表面安装工艺基本流程	(260)
6.4 粘结剂、焊膏的涂抹	(263)
6.5 元件的传输、定位与放置	(266)
6.6 热熔焊、波峰焊的原理与特点	(270)
6.7 安装组件的清洗	(276)
6.8 表面安装要求的元器件	(280)
6.9 片式阻容元件的设计思路	(281)
6.10 片式阻容元件的性能和外形特征	(284)
6.11 片式阻容元件的结构	(286)
6.12 片式阻容元件的性能和工艺	(290)

思考题	(297)
-----------	-------

附 录

A 阻容元件的主材料、结构特征、用途分类	(302)
B 阻容元件命名中的符号含义	(303)
C E6、E12、E24、E48、E96 系列值	(304)
D 色标与文字符号的含义	(305)
参考文献	(306)

1 阻容元件的性能

阻容元件泛指电阻器、电容器,是电子设备中的主要元件。电阻器的主要作用是降压、分压、限流、分流,还可作为时间电路元件和传感器等;电容器则具有隔直流、提供容抗参数和贮存电能等作用,广泛地被用于隔直流、谐振、信号耦合、滤波、移相、能量转换和传感等电路中。

本章就阻容元件的分类、命名和它们的一般性能作简要介绍。

1.1 阻容元件的分类与命名

阻容元件的分类方法很多,最常采用的方法是以其用途、主材料和结构特征进行分类的。电阻器按其用途可分为普通型、精密型、功率型、高阻型、高频型、高压型等;按其结构特征可分为线绕型、膜型、箔片型和实芯型等。电阻器使用的主材料有电阻合金、金属氧化物、碳、金属玻璃釉、导电合成物等。电容器按其用途可分为普通型、高压型、精密型、高功率型、高频型和特殊型等;电容器按其结构特征可分为片式(迭片式)、管式、独石式、卷绕式、表面式、晶界式、箔式和烧结式等;电容器使用的主材料有云母、陶瓷、玻璃釉(玻璃)、聚合物薄膜、电容器纸、氧化物绝缘层、阀门金属氧化物等。

据此,各种阻容元件使用的主材料、结构特征、用途的分类汇总列入本书末的附录 A 中。

为了识别阻容元件及其使用材料、使用场合等,规定了阻容元件的命名方法。该方法规定产品型号由四部分组成:主称(用字母表示,表征元件的功能),材料(用字母表示,表征使用的主要功能材料),分类(一般用数字表示,个别类型用字母表示,是元件的结构或用途特征类型代号),序号(用数字表示,用于区分同样特征、同种主材料、同样功能元件的不同品种)。

国家标准规定阻容元件型号标示中主称、材料、分类的符号及含义见本书末的附录 B。

阻容元件的型号命名示例如下:

阻容元件型号	主称	材料	分类	序号
精密金属膜电阻器	R	J	7	()
微调有机实芯电位器	W	S	W	()
高频瓷介圆片电容器	C	C	1	()
高压云母电容器	C	Y	8	()
穿心金属化纸介电容器	C	J	5	()
箔式铝电解电容器	C	D	1	()

1.2 阻容元件的标称值和允差

电阻器的电阻值是描述元件阻流特性的参数,导体两点间恒定电压为 1 伏特(简称伏,用 V 表示),两点间导体内产生 1 安培(简称安,用 A 表示)电流时,该两点间的电阻为 1 欧姆(简称欧,用 Ω 表示);电容器的电容量是描述元件极板载荷特性的参数,电位差为 1 伏的两极板上所载的电荷量为 1 库仑时,该两极板构成电容器的电容量为 1 法拉(简称法,用 F 表示)。

为了描述比法拉、欧姆的量值小或大的电容量、电阻值,常在这些单位前加上词头 p($\times 10^{-12}$)、n($\times 10^{-9}$)、 μ ($\times 10^{-6}$)、m($\times 10^{-3}$)、k($\times 10^3$)、M($\times 10^6$)、G($\times 10^9$)、T($\times 10^{12}$)等。电阻器的电阻值一般比欧姆(Ω)的量值大,常在 Ω 前加 k($1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$)、M($1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$)、G($1\text{G}\Omega = 10^9\Omega$)、T($1\text{T}\Omega = 10^{12}\Omega$)等;电容器的电容量一般比法拉(F)的量值小,常在 F 前加 p($1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$)、n($1\text{nF} = 10^{-9}\text{F}$)、 μ ($1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$)等。

每一个阻容元件上都标有其具有的电阻值或电容量,称它们为元件的标称值。阻容元件的标称值与元件的实际电阻值、电容量会有一定的偏差,这种偏差称为参数偏差。产生偏差的原因是由在工业生产中材料的不均匀性和结构、工艺上的种种不一致因素所造成的分散性。为此,有关阻容元件的国家标准中规定了“固定式电阻器标称阻值系列”和“固定式电容器标称容量系列”。运用这些优选的标称值系列,工业生产中的任一正常产品都可以在合理范围内,根据允许偏差归并到最相近的某一标称值规格中去,这样既简化了规格,又降低了成本。对于一些由于生产工艺上的疏忽而造成参数值偏差大的产品,因不能成为其它电性能一尺寸配伍的品种而成为废品。

我国采用的固定式阻容元件的标称值是按下列各式的计算值再经必要修正而得到的一系列优选数值而组成 E24、E12、E6 系列,即

$$\text{E24 系列: } x = \sqrt[24]{10^n} = \lg^{-1} \frac{n}{24} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, 23 \quad (1.1)$$

$$\text{E12 系列: } x = \sqrt[12]{10^n} = \lg^{-1} \frac{n}{12} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, 11 \quad (1.2)$$

$$\text{E6 系列: } x = \sqrt[6]{10^n} = \lg^{-1} \frac{n}{6} \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, 5 \quad (1.3)$$

E24、E12、E6 系列适用的允许偏差分别为 $\pm 5\%$ (I 级)、 $\pm 10\%$ (II 级)、 $\pm 20\%$ (III 级)。这三个标称值系列的特点是某一数值的正误差极限差不多恰好与下一个数值的负误差极限相衔接。对于参数值更精密的元件,还可以选用 E48、E96、E192 系列,与它们配合的允许偏差更小,如 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 等。

E6、E12、E24、E48、E96 诸系列值的数据,见附录 C。元件的标称值应符合表列数字之一或表列值乘以 10^n ,其中 n 为正整数或负整数。

1.3 阻容元件参数的稳定性

元件参数的稳定性泛指元件参数因各种环境条件变化而导致参数变化的情况,变化较小的稳定性好,变化较大的稳定性差。当条件变化引起的参数变化能随条件复原而回到原

来数值的称为可逆变化,参数的变化反应其对条件变化的应变特性;当条件变化过大导致即使条件复原,还是留下了参数的永久性变化时,这种变化就是不可逆变化。如阻容元件参数的温度系数和百分温度变化率是表征参数温度特性的应变特性参数,而参数的稳定性系数则表征参数不可逆变化的情况。

1.3.1 参数的应变特性

阻容元件的各项性能参数都会随外界条件的变化而变化,诸如在温度、气压、湿度、场强、频率、压力等外界条件发生变化时,某一性能参数就会发生相应的变化,这表明性能参数具有对外界条件的依从性。譬如:负温度系数的介质材料在温度升高时介电常数要变小;当外界大气压升高时诸多铁电材料的相变温度要发生变化;湿度升高时,防潮保护欠佳的高阻电阻器的阻值会下降;不少极性介质在测试信号场强升高时,其介电常数会变大;频率升得很高时,利用体电阻的电阻器的阻值会变大等等。由于环境条件变化会导致元件参数的相应变化,所以研究元件参数对各种环境的应变特性就显得十分必要。在本节中,以参数对温度变化的顺应特性为例作简要说明。

元件参数往往由于材料参数随温度的变化、元件结构和加工工艺的差别等原因,对温度有一定的依赖关系,其中材料参数(如介电常数、电阻率)的温度特性会对元件参数的温度特性起决定性作用:电容量(或电阻值)随着温度的变化规律常常是介质材料(或电阻材料)的介电常数(或电阻率)随温度变化规律的反映,也往往受元件线胀系数的明显影响。

1) 参数值的温度系数

为评定元件参数的温度稳定性,常采用以温度每变化1度时参数的相对变化即温度系数作为判据。当上式中的 A 为电容器的电容量(C)时,式(1.4)描述的即为容量温度系数 TCC (或 α_C);当 A 为电阻器的电阻值(R)时,式(1.4)描述的即为电阻温度系数 TCR (或 α_R)。

$$\alpha = \frac{1}{A} \cdot \frac{dA}{dt} \quad (^\circ\text{C})^{-1} \quad (1.4)$$

由式(1.4)可见,温度系数 α 的物理意义是参数变化率—温度关系曲线上某一点的斜率(即所谓微分温度系数)。在通常情况下,了解某一温度时的温度系数并无多大实用意义,这是因为工程上希望得到的常是某一较宽温度范围内的温度系数(即所谓积分温度系数或平均温度系数)。如果参数随温度的变化是线性的,则温度系数表达式为:

$$\alpha = \frac{1}{A_1} \cdot \frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1} \quad (^\circ\text{C})^{-1} \quad (1.5)$$

式中: A_1 为温度 t_1 时的参数值; A_2 为温度 t_2 时的数值。通常 α 的量值很小,工程上以 10^{-6} 量级来表示。

一般说来,元件参数(电容量或电阻值)的温度特性并非严格地呈直线的。当 α 较大时,其偏离也较大(见图 1.1);显然当 $\Delta t = t_2 - t_1$ 取得越小,计算出的 α 愈接近实际情况,而按式(1.5)计算所得的 α 值偏离实际情况就愈明显。为此,元件的温度系数被规定有一个允许范围,这就可由下式通过温度系数和它的允差范围来计算某一温度时的参数

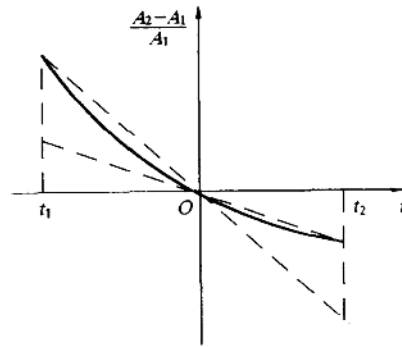


图 1.1 参数的温度特性

范围:

$$A_t = (A \pm \text{允差}_A) [1 + (\alpha \pm \text{允差}_\alpha)(t_2 - t_1) \times 10^{-6}] \quad (1.6)$$

2) 参数的百分温度变化率

对于一些参数稳定性较差的阻容元件,常用参数的百分变化率来表示参数可逆变化的稳定性,参数顺应温度的可逆变化则用参数的百分温度变化率来表示,它的意义是用百分数表示的相对变化,即

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{B_2 - B_1}{B_1} \times 100\% \quad (1.7)$$

式中 B_2 、 B_1 分别是测试温度下和室温下的参数值。实用中,测试温度常是极限使用温度,也就是说,对于温度稳定性差的阻容元件,是用参数在正(或负)极限温度时的值与室温值的百分相对变化来衡量其温度稳定性的。如涤纶、纸介、金属化纸介电容器的 $\Delta B/B$ 在 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 的范围;Ⅱ型瓷介电容器的 $\Delta B/B$ 在正负极限温度下都是负值,在 $-20\% \sim -85\%$ 的范围;铝电解电容器的 $\Delta B/B$ 在 $40\% \sim -90\%$ 的范围内变动等等。

3) 电阻器的阻值温度特性

电阻材料的电阻率都是温度的函数,对于各种类型的电阻器,由于使用的电阻材料、基体、胶合剂和保护层以及制造方法的不同,它们的阻值与温度间的关系各不相同。图 1.2 示出了几种常用类型的电阻器的电阻值与温度的关系。

(a) 对于纯金属材料,其电阻主要是由自由电子与晶格相互作用发生散射而产生的。温度越高时晶体热振动越大,电子被散射的几率也越大,电阻率就越高,因此纯金属的电阻率在温度不太低的情况下与热力学温度成正比($\rho = AT$),电阻值与温度呈线性关系(见图 1.2(a)),其阻值温度系数(α_{rm})恒为正值,即

$$\alpha_{rm} = 1/T \quad (1.8)$$

(b) 对于合金材料,由于杂质原子的加入而破坏了原晶格的周期性排列,使自由电子发生散射的几率增加,导致合金材料的电阻率高于纯金属。合金材料的电阻值与温度也呈线性关系(见图 1.2(b)),但其阻值温度系数(α_{ra})要比纯金属的小 1~2 个数量级(这对制造精密型电阻器是有利的),其表达式为

$$\alpha_{ra} = 1/(B + T) \quad (1.9)$$

(c) 一些半导体材料、金属在非金属中的分散体系等利用激活载流子导电的材料,其电阻率与温度的关系常呈下式的指数形式(见图 1.2(c)):

$$\rho = \rho_0 e^{b/T} \quad (1.10)$$

式中: b 为与材料载流子的热激活能有关的参数,温度越高,产生的载流子越多,电阻率越低。

由热激活机理引起的阻值温度特性中,温度系数与温度的关系呈下式的形式,这类材料的电阻温度系数 α_{rs} 是负的,且强烈地依赖于温度。

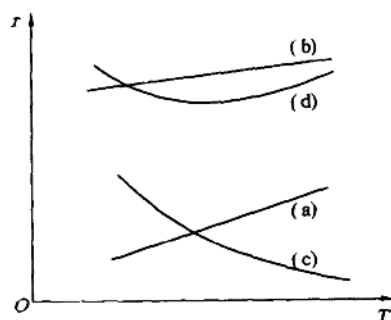


图 1.2 电阻材料的阻-温特性

$$\alpha_{rs} = -b/T^2 \quad (1.11)$$

(d) 另外,有的电阻器采用的电阻材料是导电材料与一些绝缘材料组合成的导电合成物,导电颗粒之间的接触电阻对导电合成物的电阻率有着很大的影响。由于绝缘粘结剂的热胀系数比电阻材料大得多,当温度升高时,接触压力变小而使阻值升高。如果导电合成物中的导电材料选用石墨、碳墨之类的激活型电子导电机理的材料,则其阻值温度特性如图1.2(d)。

4) 电容器的容量温度特性

根据介质的介电常数与温度之间的关系是否成线性,可分为容量温度特性($C-T$)呈线性和非线性的两种特性的电容器。前者是由极化为电子位移极化和离子位移极化的材料作为介质的,这种介质的 $\epsilon-T$ 特性呈线性或仅在某一温度范围内呈弱非线性;后者是由极性介质或具有自发极化的材料作介质的,这种介质的 $\epsilon-T$ 特性呈非线性甚至呈强烈非线性。再加上采用的辅助材料和制造工艺上的差别,各种电容器的容量-温度特性各不相同。几种常见电容器的容量-温度特性见表1.1所示。

表 1.1 常见电容器的容量-温度特性

电容器类型	$\alpha_C / \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	电容器类型	$\Delta C / C / \%$
云母电容器	$\pm 50 \sim \pm 200$	聚丙烯电容器	± 2
聚苯乙烯电容器	$-200 \sim -100$	涤纶电容器	$-5 \sim +12$
聚四氟乙烯电容器	± 200	金属化纸电容器	$\pm 5 \sim \pm 10$
高频瓷介电容器	$+120 \sim -1300$	低频瓷介电容器	$-20 \sim -80$
高频独石电容器	$+33 \sim -2200$	铝电解电容器	$-90 \sim 40$
玻璃釉电容器	$+40 \sim +100$	固体钽电解电容器	± 15

1.3.2 参数的稳定性系数

通常情况下,处于极限范围以内条件下工作的元件,随着工作条件的恢复,其参数变化会自行消失。但如果超出极限范围,就会由于各种原因,元件内部发生化学、物理或电化学变化,以及恶劣潮湿条件、高场强、辐射等的作用,使参数产生不可逆变化。对这些一经产生就不再消失的变化,常采用参数的稳定性系数来描述其不可逆变化的程度,即

$$\beta = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \times 100\% \quad (1.12)$$

式中: D_1 为试验前的参数值; D_2 为经试验后的参数值。如果 D_2 是经冷热循环后恢复到室温时的参数值,则由式(1.12)计算所得的是温度稳定性系数;如果 D_2 是经长期存放造成自然老化后的参数值,则式(1.12)代表的是径时稳定性系数;若 D_2 是经辐射后的参数值,则式(1.12)表示辐射稳定性系数。总之, D_2 是由什么条件引起的永久变化,则式(1.12)就表征参数对该条件的稳定性系数。

1.4 电容器的绝缘电阻和电阻器的杂散电容

由于电容器介质内部难免会存在自由或松结合电子、杂质、缺陷,介质的绝缘电阻就不

可能无限大;由于介质或电容器表面的缺陷和受到的各种污染所引起的表面漏导,使电容器在完成贮能、能量转换等功能的过程中引起损耗;由于电阻器引线间的电容、运行电阻器中不同电位的各部分之间形成的电容、电阻器与电路其它元件或底板之间的杂散电容等,使得电阻器在使用中会引起时间常数偏离、与其它元件产生不必要的耦合、造成相位移等不利影响。所以,电容器的绝缘性能和电阻器的杂散电容量是应予重视并对其进行分析研究的。

1.4.1 电容器的绝缘性能

电容器的绝缘性能是电容器质量的主要判据之一,当通过引出端在极板间施加电压时,其充电过程可描绘出电容器的绝缘性能。

1) 电容器的充电过程和电容器的绝缘电阻

在理想电容器两极板引出端(简称“端引”)间施加直流电压时,可以观察到开始时很大但很快降到接近于零的充电电流 I_C (见图 1.3(a))。对于实际电容器,则会由于电容器介质及辅助介质的性能和制造工艺等原因,可观察到漏导引起的漏电流 I_l (见图 1.3(b))和由各种缓慢极化引起的吸收电流 I_a (见图 1.3(c))。图 1.3 中曲线(d)为实际充电电流曲线,曲线(e)为实际充电过程中绝缘电阻的性状。所以当电容器极板间存在电位差时,可以观察到充电电流为

$$I = I_C + I_l + I_a = \frac{U}{r} e^{-t/rC} + \frac{U}{R_j} + \sum_{i=1}^n \frac{U}{r_{ai}} e^{-t/r_{ai}C_{ai}} \quad (1.13)$$

式中: U 为外加直流电压; r 为充电回路电阻; C 为与快极化对应的电容量; r_{ai} 、 C_{ai} 分别表示与第 i 种慢极化等效的吸收电阻和吸收电容; R_j 为表征漏导的绝缘电阻。由此可得到接入直流电路中的实际电容器等效电路如图 1.4 所示。

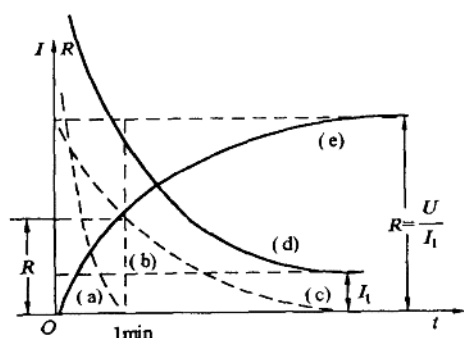


图 1.3 实际电容器的充电和绝缘性能

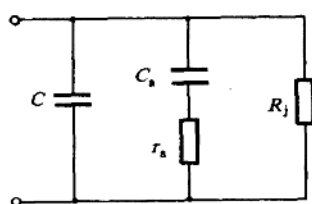


图 1.4 实际电容器的等效电路

2) 电容器绝缘性能的判据

由式(1.13)和图 1.3 可见,表征电容器直流性能的参数是绝缘电阻和表征各种缓慢极化程度强弱的吸收参数。

(1) 绝缘电阻

绝缘电阻是电容器绝缘性能的优劣主要判据。所谓绝缘电阻是指工作于直流电压(U)的电容器产生漏电流(I_l),该工作电压与漏电流之比,即

$$R_j = \frac{U}{I_1} \quad (\text{M}\Omega) \quad (1.14)$$

式中 U 以伏特(V)计, I_1 以微安(μA)计。漏电流是由电容器的表面漏电阻(R_S)和体积漏电阻(R_V)分别引起的表面漏电流和体积漏电流的总和。前者大多数取决于包封材料或外壳材料,以及外表面的受潮或污染情况;后者取决于介质材料本身的性能。

$$R = \frac{R_S \cdot R_V}{R_S + R_V} \quad (1.15)$$

对于电容量较大、防潮保护良好、表面无沾污的电容器, $R_S \gg R_V$, 则由式(1.15)可知 $R \approx R_V$; 对于电容量较小, 或容量虽大, 但表面沾污或受潮较为严重的电容器, $R_V \gg R_S$, 则 $R \approx R_S$ 。也就是说, 大容量电容器($C > 0.1\mu\text{F}$)的绝缘电阻主要取决于工作介质的性能; 而容量较小($C < 0.1\mu\text{F}$)或容量虽大但表面受潮或沾污时, 电容器的绝缘电阻主要取决于电容器的表面性状。

(2) 时间常数

如果不改变介质材料, 制作大容量电容器的方案是增大极板面积(S)或减小介质厚度(d), 由于 $R_V = \rho_V d/S$, 这都将导致 R_V 减小, 从而得出绝缘电阻变小的结论。若用绝缘电阻的大小来判别其绝缘性能的优劣, 则显然会得出大容量电容器绝缘性能不良的错误结论。为此引入电容器的绝缘电阻(R)与容量(C)的积($R \cdot C$)作为电容器绝缘性能优劣的判据。即

$$\tau = R \cdot C \quad (\text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}) \quad (1.16)$$

式中 τ 为电容器的时间常数, 单位为 $\text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ 或 S 。若以平板电容器为例, 则有

$$\begin{aligned} \tau = R \cdot C &= (\rho_V \frac{d}{S} \times 10^{-6}) (\frac{S}{3.6\pi d} \times 10^{-6}) = \\ &8.84 \times 10^{-14} \rho_V \cdot \epsilon = k \rho_V \epsilon \end{aligned} \quad (1.17)$$

由上式可见, 时间常数(τ)是由介质材料本身的性质(ρ_V, ϵ)所决定的, 用它来判定电容器的绝缘性能是比较可靠的。

各类电容器的绝缘电阻(或时间常数)值见表 1.2 所示。

表 1.2 几种电容器 25℃ 下的绝缘性能

电容器名称	绝缘性能
云母电容器	$R > 1 \times 10^4 \text{M}\Omega$
玻璃釉电容器	$R \geq 1 \times 10^4 \text{M}\Omega$
高频瓷介电容器	$R \geq 1 \times 10^4 \text{M}\Omega$
低频瓷介电容器	$R \geq 10^4 \text{M}\Omega$ ($C \leq 0.1\mu\text{F}$); $\tau \geq 50 \text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ ($C > 0.1\mu\text{F}$)
金属化纸介电容器	$R > 5 \times 10^3 \text{M}\Omega$ ($C \leq 0.1\mu\text{F}$); $\tau \geq 10^3 \text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ ($C > 0.22\mu\text{F}$)
金属化涤纶电容器	$R > 10^4 \text{M}\Omega$ ($C \leq 0.33\mu\text{F}$); $\tau \geq 3 \times 10^3 \text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ ($C > 0.33\mu\text{F}$)
小型精密聚苯乙烯电容器	$R > 5 \times 10^4 \text{M}\Omega$ ($C < 0.47\mu\text{F}$); $\tau \geq 5 \times 10^3 \text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ ($C > 0.47\mu\text{F}$)
高压纸膜复合介质电容器	$R > 10^4 \text{M}\Omega$ ($C \leq 0.1\mu\text{F}$); $\tau \geq 2 \times 10^3 \text{M}\Omega \cdot \mu\text{F}$ ($C > 0.1\mu\text{F}$)

(3) 漏电流

对于电解电容器这类电容器,其绝缘性能取决于氧化膜的质量。氧化膜上的孔洞、裂缝等疵点决定着电容器的漏电流。因此,可由漏电流的大小来作为判定电解电容器绝缘性能是否良好的依据。电解电容器的漏电流与容量大小和施加的电压有关,可表示为

$$I_l = KCU \quad (1.18)$$

式中: U 为施加电压,单位为伏; C 为标称容量、单位为微法; K 为漏电流系数,单位为微安/(微法·伏)。各类电解电容器具有不同的 K 值: CDX 型铝解电容器的 $K \approx 0.1$; CA 型钽电解电容器的 $K \approx 0.02 \sim 0.04$ 。 I_l 的单位为微安。

若考虑到除了氧化膜质量引起的漏电流外,电容器还有可能存在着其它部分(如表面)引起的漏电流,则可对式(1.18)予以修正,即

$$I_l = KCU + M \quad (1.19)$$

式中: M 为其值取决于电解电容器的结构和额定电压的系数。当阳极引出绝缘子质量很好,表面漏电流很小时, $M = 0$; 当额定工作电压较高,且电容量较小、电容器表面及其它部分的漏电流影响较大时, M 就较大。

3) 环境条件对电容器绝缘电阻的影响

电容器绝缘电阻的测量值除了取决于介质材料的性质之外,诸如温度、测试电压、测试时间间隔、环境湿度等条件的改变,都会对其造成明显的影响。

绝缘电阻随温度的变化主要由漏电流随温度的变化而引起。对于电容量较大而防潮保护又好的电容器,其绝缘电阻取决于介质的体电阻率 ρ_v 。此时,其绝缘电阻与温度的关系符合介质的 ρ_v 与温度的关系,即

$$R_{T_2} = R_{T_1} e^{-\alpha(T_2 - T_1)} \quad \text{或} \quad \lg(R_{T_2}/R_{T_1}) = -\beta(T_2 - T_1) \quad (1.20)$$

式中: R_{T_1} 、 R_{T_2} 分别为温度 T_1 、 T_2 时的绝缘电阻; $\beta = 0.434\alpha$ 为取决于介质的系数。由式(1.20)可见 $\lg R = f(T)$ 为一直线,且随温度升高绝缘电阻下降,电容器的时间常数随之减小(见图 1.5)。图中每条直线的斜率即为相应的 β 值。各类电容器的 β 值不相同,这些值是由当前的介质材料的性能参数和现行的工艺状况所决定的。由于介质材料的性能差异, β 值不同。随着科学技术的发展和生产工艺的进步, β 值会有可能进一步减小。

图 1.5 定性地说, β 值大的其时间常数的温度稳定性就差。常见电容器的时间常数的温度稳定性在温度不很高时,是按云母(1)、钽电解(2)、铝电解(3)、聚四氟乙烯(4)、聚苯乙烯(5)、纸(6)、涤纶(7)、聚乙烯(8)次序,前者较好,后者较差。

对于容量较小、防潮保护不好、及存在缓慢极化的情况下,绝缘电阻随温度的变化常因元件被干燥或缓慢极化被加速而呈非线性关系,且在被干燥或极化被加速的某温度,曲线发生明显转折(见图 1.6)。

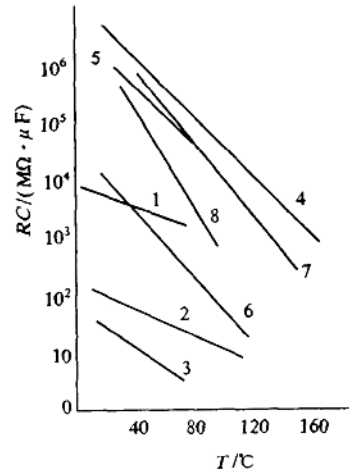


图 1.5 几种电容器的时间常数-温度特性

电容器的绝缘电阻与测试电压的关系主要取决于介质的电阻率对电压的依从关系。对结构均匀的介质而言,当外加电压小于击穿电压时,其漏电流与电压的关系符合欧姆定律,即绝缘电阻不随电压发生变化;由于介质的不完全均匀性,在电压高于某值时,部分弱联系离子变成自由而参与导电,绝缘电阻趋于减小。为了避免测试电压对绝缘电阻的测量结果造成影响,常采用测试电压为 100V;对于低工作电压(如 63V)的电容器,则规定测试电压为 10V。

4) 提高电容器绝缘电阻(或时间常数)的方法

提高电容器的绝缘电阻,可改善电容器的绝缘性能和减小电容器的损耗。为此,为提高电容器的绝缘电阻作了不少努力,取得了不小的收获。常用的方法大致如下:

- (1) 选用体电阻率高的材料作为介质;
- (2) 严格材料加工和元件的制造工艺,防止介质表面吸附潮气和沾染杂质;
- (3) 为防止吸湿,对于吸水性强的多孔介质,必须注意防潮,用矿物油、石蜡、地蜡等予以浸渍,在亲水性介质表面涂以疏水层,尽量采用疏水性介质来制造电容器;
- (4) 对液体介质应仔细进行净化,减小杂质含量和消除气泡,已经净化的液体介质必须妥善保管,防止贮存、运输和使用过程中再度混入杂质;
- (5) 在液体介质中加入能增加其粘度但不使其它性质恶化的改性物质,从而降低杂质离子的迁移速度,以提高电容器的绝缘电阻;
- (6) 对于无机介质(如陶瓷、玻璃等),可加入改性添加物,以减小它们的电导;
- (7) 生产出的电容器芯,应及时进行真空干燥或浸渍处理,并于处理后立即进行防潮保护(如涂覆、包封、全密封等);
- (8) 电容器必须在比产品规定的工作温度、湿度、电压为低的条件下工作,以防止使用不当导致其绝缘电阻下降。

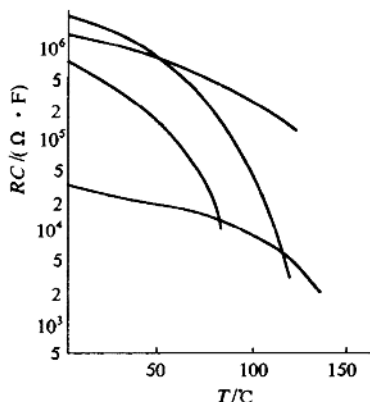


图 1.6 引起介电性状改变的温度处,时间常数 - 温度特性出现明显转折

1.4.2 电阻器的杂散电容

在工作频率比较高的交流电路中,电阻器的无功分量会影响电路的参数特性,也会对电路的其它部分构成“干扰”之类的影响,对此务必引起足够的重视。

电阻器的杂散电容引起无功分量,也是引起电路参数改变和对外电路干扰的主要原因。影响电路特性的电阻器杂散参数主要是端引间的电容(C_0)和电阻体单位长度的分布电容(C')。其中 C_0 取决端引的大小和引线间的距离,轴向引线的 C_0 较小,单端引线的 C_0 较大,通常 C_0 不大于 1pF; C' 与电阻器的结构有关,它取决于形状系数 k ,即

$$C' = 0.01 \times 10^{0.8/k} \quad (1.21)$$

式中: $k = l/\pi D$, 其中 l 为电阻体的有效长度, D 为圆柱形电阻体的直径。 C' 还与电阻器绝缘基体以及保护层的介电常数有关;对于刻槽电阻,还与刻槽宽度、刻槽距离的比值(a/t)

有关。

电阻器对外电路产生干扰的原因之一是电阻器与电路中其他元件以及底板之间的杂散电容(C'')引起的。在电阻器与电路中其它部件间的距离确定的情况下, C'' 的大小与电阻器的外形、体积和引线长度有关,小型化、短引线有助于减小这种影响。

1.5 阻容元件的荷电性、阻流性及其高频性状

阻容元件是由金属极板及它们之间的功能材料(介质或电阻材料)构成的:中间夹有介质的两块金属板构成了电容器;利用阻碍电流通过的电阻材料构成的具有阻流性能的元件称为电阻器。当金属极板的面积和它们之间的距离相同时,电容器的电容量的大小取决于电容器极板上电荷的多少,即取决于介质材料的介电性能;电阻器的阻值的大小取决于电阻材料的阻流特性,即取决于电阻材料的导电性能。介电常数(ϵ ,或称电容率)和电阻率(ρ)则是用来分别描述材料介电性能和导电性能的重要参数。

1.5.1 介质材料的介电性能

1) 介质的介电常数

真空中的两金属极板构成真空电容器,该真空电容器极板上所带的电荷与金属极板间的电位差(U)和真空电容器的电容量(C_0)之间的关系式为

$$Q_0 = C_0 U \quad (1.22)$$

当金属极板间充以电介质,则由于电场中的电介质被感应极化,介质表面产生感应电荷,致使极板上出现被束缚电荷,即在极板间电位差不变的情况下,金属极板上的电荷由 Q_0 增加到 $Q(Q = Q_0 + Q_{\text{束}})$ (见图 1.7),电介质的介电常数则是用来表征这种介质被电场极化难易程度的参数,即

$$\epsilon = Q/Q_0 \quad (1.23)$$

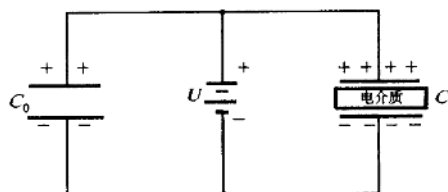


图 1.7 极板上的束缚电荷随插入介质而变化

由上式可见, ϵ 越大的介质,在电场中越容易被感应极化,电容器极板上束缚电荷越多,由它制成的电容器贮存电荷的能力越强,即电容量越大。

(1) 电场中的介质极化

介质的极化形式主要有电子位移极化、离子位移极化、热离子极化、转向极化和自发极化等五种。电子位移极化在任何介质中都会出现,当外加电场使得电子相对于原子核发生局部位移,使正、负电荷的重心不再重合,从而引起介质表面出现束缚电荷,该过程需要的时间很短($10^{-13} \sim 10^{-15}$ s)。当外电场作用于离子型晶体时,除了产生电子位移极化外,还会发生正负离子在弹性范围内的相对位移,形成离子位移极化而增加介质表面的束缚电荷,完成这种极化所需要的时间也很短($10^{-13} \sim 10^{-12}$ s)。它们被称为快极化,即使电信号频率高至光频,这两种极化可在瞬间跟随完成,因此不引起能量损耗。热离子极化发生在由离子结合成的晶体或无定形的无机玻璃介质中,由于这些介质中存在着与周围离子相互联系较弱的弱系离子,通常作无规则热运动,不显示极化特性。但在外加电场作用下,沿电场方向的离

子迁移机会增加,会形成电偶极子,导致介质表面出现束缚电荷,建立这种极化需要的时间较长($10^{-5} \sim 10^{-3}$ s)。随着温度降低,建立这种极化所需的时间更长。因此,当外加电场的频率较高时,极化就会跟不上外加电场方向的变化,发生极化损耗。转向极化发生在具有固有偶极子的极性介质中,在外加电场的作用下介质中的固有偶极子被转向,从而在介质表面产生束缚电荷。由于固有偶极子的转向受到偶极子的相互牵制和热运动的影响,所以它沿外电场方向的有序排列并不容易,建立这种极化需要的时间较长($10^{-6} \sim 10^{-2}$ s),也会产生极化损耗。某些晶体或多晶体在一定的温度范围内,即使无外电场作用,也会在某一小区域范围内存在有序的固有电偶极子,即存在“自发极化”。凡具有自发极化且能被外加电场转向的晶体称之为铁电体,铁电晶体的自发极化转向需要更长的时间,并会出现电滞现象和极化损耗。

(2) 介质材料与介电常数

介质的介电常数与材料的微观结构有关,材料结构上的特点会明显影响它在电场中的极化行为,造成不同结构的介质材料具有不同的极化形式。而不同形式的极化对介电常数量值上的贡献就不同,这种贡献受温度、频率的影响也不同,简要说明于下:

① 中性或弱极性介质是以电子位移为主要极化形式,极化能在瞬间建立,其介电常数(ϵ)值不大(约 1.8~2.6)。由于这种快极化的建立能在信号周期内瞬间完成,极化过程不会引起能量损耗。随着温度的升高,由于体积膨胀,单位体积内的极化量有所下降,导致介电常数下降,表现为介电常数的温度系数(α_ϵ)为负值。这种介质通常用于制造能在高频下工作的高品质电容器。

常用的中性介质如聚四氟乙烯、聚苯乙烯、聚乙烯、聚丙烯等各种非极性(或弱极性)有机薄膜材料。

② 极性介质是以固有偶极子的转向极化为主要形式,是由极性介质中的极性基、极性链节或整个极性分子在外场作用下取向而产生,完成这种极化需要较长的时间,这种介质的介电常数比中性介质的大(约 3.0~6.5)。

由于这种材料分子间相互作用力与温度相关:温度较低时,作用力强,固有偶极子无法随外电场取向,此时介质极化对介电常数的贡献仅以位移极化为主;温度升高时,分子间作用力减少,偶极子随外电场的取向变得容易,介质的介电常数也随之增大;高温时分子热运动加剧,破坏了偶极子被外电场的取向,导致介电常数下降。所以,这类介质 $\epsilon - T$ 曲线的特征是可以观察到某一温度时,介电常数有最大值。

这类介质的介电常数-频率特性呈现低频时介电常数几乎不随频率变化。介质的极化包括电子位移极化和固有偶极子的转向极化,介质的介电常数也为这两部分极化贡献的总和,即 $\epsilon = \epsilon_\infty + \epsilon_d$ 。随着频率的增高,转向极化逐渐跟不上信号的变化,介电常数下降并出现介质损耗增大。当频率升高到某一特定值时,转向极化已无法产生,介电常数下降到最低值(即 ϵ_∞)。

由于这类介质的介电常数的温度、频率特性不佳,一般只适用于制造低频和稳定性要求不高的电容器,但由于其介电常数较大,利于电容器的小型化。

常用的极性介质如涤纶、聚碳酸酯、纤维素等。

③ 离子结构介质的介电常数与介质的晶体结构和极化形式相关:其中结构紧密的离子晶体具有电子位移极化和离子位移极化,其介电常数较低(约 5~13),介电常数的温度、频