

高等学校教材

电容器 性能与设计计算

谢道华 编

中国标准出版社

电 容 器

性能与设计计算

谢道华 编

责任编辑 赵慧玲

*

中国标准出版社出版
(北京复外三里河)

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

版权专有 不得翻印

*

开本 850×1168 1/32 印张 9 字数 266000

1991年 3 月第一版 1991年 3 月第一次印刷

*

ISBN7-5066-0257-11TN·002

印数 1—2 000 定价 2.15 元

*

科目 227-23

内 容 简 介

本书系统介绍了电容器各项特性参数（容量、容量温度系数、绝缘电阻、吸收系数、电感量、损耗、最大温升、介电强度、非线性等）的物理意义、计算方法、使用特性、测试原理。同时还讨论了电容器的环境效应以及设计计算方法。

本书是电子材料与元器件专业的专业教材，也可供电子工业有关研究、生产和使用电容器的工程技术人员参考。

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由《电子材料与固体器件》教材编审委员会《电子材料与器件》编审小组征稿,推荐出版,责任编委恽正中。

本教材由天津大学担任主编,成都电子科技大学傅应泉担任主审。

本课程的参考学时数为 50 学时,其主要内容为电容器各项特性参数的物理意义、计算方法、使用特性、测试原理以及各类电容器的设计计算方法。全书共分九章,第一章至第四章重点讨论电容器容量的计算以及电容量的温度、频率特性,电容器的绝缘电阻与吸收系数,电容器电感的计算及阻抗频率特性,电容器在交直流和脉冲状态下损耗的计算方法。第五章介绍了电容器的发热计算,对电容器的可靠性有重要意义。第六章较详细地讨论了电容器的介电强度及其计算方法。第七章介绍了电容器的非线性失真机理、主要指标及其测试原理。第八章介绍了电离辐射、湿度、温度、动态环境以及大气等环境条件对电容器性能的影响。第九章主要分析电容器的设计计算方法。使用本教材时应注意重点介绍电容器的电容量、容量温度系数、绝缘电阻(时间常数或漏电流)、吸收系数、电感量、损耗、介电强度、非线性等主要质量指标,计算方法及其影响因素。详细介绍电容器的发热计算及各类电容器的设计计算方法,扼要介绍电容器的环境效应。在讲授过程中应配合附录 I 中的习题、思考题进行练习并安排适当的实验课程和课程设计以巩固所学的内容。

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。

目 录

绪论	1
第一章 电容器的电容量	5
1.1 概述	5
1.2 电容器电容量的计算	18
1.3 电容器的容量频率特性与有效电容量	36
1.4 电容器的容量温度特性	49
第二章 电容器的绝缘电阻和吸收系数	66
2.1 表征电容器绝缘性能的参数	66
2.2 电容器的绝缘电阻与外界因素的关系	72
2.3 电容器的吸收系数	77
2.4 介质吸收对电路的影响	84
第三章 电容器的电感及阻抗频率特性	91
3.1 电感的一般概念	91
3.2 电容器芯子电感的计算	95
3.3 电容器引线和引出片的电感	101
3.4 降低电感的措施	105
3.5 电容器的阻抗频率特性和电感的测试原理	109
第四章 电容器的损耗	121
4.1 电容器的能量损耗	121
4.2 电容器介质部分的损耗	127
4.3 电容器金属部分的损耗	131
4.4 在脉冲状态下电容器的损耗	149
4.5 电容器 $\tan\delta$ 与外界因素的关系	158
第五章 电容器的发热计算	164
5.1 电容器的温升	165
5.2 几种典型结构电容器的热计算	168

5.3	电容器的散热系数	180
5.4	电容器的热计算实例	184
第六章 电容器的介电强度及其有关计算		189
6.1	电容器的介电强度	189
6.2	瞬时电压作用下电容器的击穿	194
6.3	电容器的边缘击穿	201
6.4	在长期电压作用下电容器的击穿强度	207
第七章 电容器的非线性		214
7.1	电容器的非线性畸变	214
7.2	电容器的非线性测量	218
7.3	电容器的非线性指标	220
7.4	产生非线性失真的机理	222
第八章 电容器的环境效应		224
8.1	辐射对电容器的影响	224
8.2	电容器在电离辐射环境中的性能	228
8.3	防辐射技术	233
8.4	在环境应力下电容器的失效	234
8.5	电容器的可靠性	239
第九章 电容器的设计计算		249
9.1	电容器设计计算的主要过程	250
9.2	电容器设计计算实例	261
附录 I 习题		270
附录 II 参考文献		276

绪 论

电容器是由介质隔开的两块金属极板构成的电子元件,它是电子设备中主要基础元件之一,广泛用作储能和传递信息。

在电子工程中它用于发送、接收设备、电视、计算机、电子仪器、电工测量仪器、自动装置中;在电力工程中用于改善系统功率因数、防止过电压、获得瞬时大电流、电机起动、灭弧,同时还广泛用于高频加热、高频淬火、发动机点火、家用电器、闪光摄影等处。

电容器在上述领域的应用可按其在电路中完成的功能区分如下:

(1) 隔直流 电容器有效地阻止直流而限制低频交流,对高频电流没有多大影响,常用来使电路某一部分不出现直流电压。

(2) 旁路(去耦) 电容器为交流电路中某些与之并联的元件提供低阻抗通路。此类电容器要求有低的损耗因数和电感。

(3) 耦合 电容器用于电路的级间连接,允许交流信号通过并传输到下一级电路而阻止直流通过。

(4) 滤波 电容器与电感线圈或电阻器按一定方式连接,可以有选择性的传输不同频率。此类电容器要求有高的频率稳定性和低的损耗因数。

(5) 温度补偿 电容器用于对其它元件进行温度补偿,从而改善电路的稳定性。此种电容器的容量温度系数可按标准系列选取。

(6) 计时 电容器与电阻器配合使用可确定电路的时间常数。时标电容器的容量愈大,其保持信号没有多大漂移的时间愈长,但这将降低充电速率。因此,对于每种应用的电容量必须取最佳值。在保持期间,环境温度每上升 10°C 其漂移趋向于增大一倍。保持电容器应有高的绝缘电阻,低的吸收系数和长期稳定性。

(7) 瞬变电压抑制 电容器并联在电路元件两端吸收瞬变峰值

电压,这种电压可使电路失真或遭到破坏。这个原理可用于降低整流电源中的交流波纹电压。此种电容器应有高的波纹电流额定值,低的阻抗和损耗因数。

(8) 调谐 电容器用于与频率有关的电路或系统的调谐。此种电容器必须有低功率因数(高 Q)和长期的稳定。

(9) 整流(半导体可控整流电路) 电容器利用存储的能量,在预定的时间关闭半导体开关元件。

(10) 储能 电容器利用一较小功率的电源长时间充电,然后在很短时间内放电,可得到很大的冲击功率。一般用于焊接、闪光灯(电容器)、加热等装置中。

(11) 无线电干扰(噪声)抑制 电容器用于吸收或抑制不希望的传导性和辐射性的电扰动,包括电气设备或电子设备在运行中产生的无线电干扰。此种应用的电容器通常分成下列两类:

“X”电容器——用于电容器损坏时将不导致触电危险的情况。

“Y”电容器——用于电容器损坏时将导致触电危险的情况。

(12) 灭弧 电容器与电阻器配合使用可降低电机设备中因弧击穿引起的接触磨损。

(13) 电机起动 将非极性电容器引入电机电路,使电机在较低的起动电流下获得较大的转矩。同时,当电机达到一定转速时利用一离心开关将电容器与电路断开。

(14) 电机起动-运行 电容器永久连接在电机电路中,用以改变电机次级绕组的相位以得到一旋转场。

(15) 功率因数校正 电容器用于改善或“校正”电路的功率因数。

(16) 微调 通过一支小的可变电容器与一支大容量电容器结合起来调整总容量。

(17) 差动 可变电容器有彼此绝缘的两组定片和一组公共动片,旋转动片时,其中一组容量增大,而另一组容量减小。此种电容器用于可变电容分压器、电容电桥、天线耦合等场合。

随着电子工业的飞速发展,人们对电容器提出了更加严格的要求,

概括起来就成为电容器的发展方向：

(1) 高度使用的可靠性 为了保证电子设备能正常工作，必须要求它具有高的可靠性。但任何电子设备都是由若干电子元器件组成的，因此设备的可靠性在很大程度上取决于元器件的可靠性，使用的元器件数愈多，这种依赖性就愈大。

若设备中任一元件的失效都将引起设备的故障，即认为元件以串联形式存在，这时设备的可靠性等于各元件可靠性的乘积，即

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n$$

若各元件的可靠性相等， $P_1 = P_2 = \dots = P_n$

则

$$P = P_1^n$$

若元件数 $n=20$ ， $P_1=99\%$ 。则设备的可靠性为 $P=82\%$ ；若 n 增加到 40， P_1 不变，则 $P=67\%$ 。上述计算表明，电子设备中使用元件数愈多其可靠性就愈低。

(2) 承受多变的应力条件 电子工业的发展要求电容器在各种恶劣的应力下使用，如宇航设备、军用设备、海底电缆、钻井设备等。这些应力条件主要包括：

电应力——电流过载、电压过载、功率过载等。

环境应力——潮湿、温度、气压、辐射、盐雾等。

机械应力——振动、冲击、加速度等。

(3) 微小型化、片状化 电子元器件的微小型化可使电子设备缩小体积、减轻重量、提高运算速度、省电、提高可靠性、减小成本。在电子元器件微小型化的发展过程中，以电子器件为先导电子元件经历了普通元件、小型元件、微型组件、片状元件的发展过程。特别是无引线片状元件的发展大大动摇了传统的组装概念，人们把它称为“组装革命”并无言过其实之处。

片状元件也称为无引线元件，在电路中的连接靠端接或面接。以其外形可分为矩形和圆柱形两种，在电路中的安装一般是扁平放置，圆柱形又称金属电极面焊型(MELF)。矩形元件偏重于提高电子设备的组装密度而 MELF 元件则偏重于提高电子产品的组装速度。

片状元件由于本身寄生参数小，高频性能好，接触可靠，显著提高

了产品的电性能和可靠性,同时片状元件还有利于实现 CAD(计算机辅助设计)、CAM(计算机辅助制造)、CAT(计算机辅助检测)。目前片状元件已涉及电阻、电容、电感、晶体管、二极管、集成电路芯片、微调元件等方面,但发展最快的还是片状化的阻容元件。

第一章 电容器的电容量

1.1 概 述

1.1.1 电容器的电容量及其使用单位

对于任何一个不受外界影响的“孤立”导体而言,当导体带电时其所带的电量 Q 与相应的电位 U 之比,是一个和导体所带的电量无关的量,称为孤立导体的电容,即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-1)$$

导体的电容,表征导体特有的性质,在数值上等于该导体的电位为一单位时导体所带的电量。若导体所带电量为 1 库仑,相对的电位为 1 伏时,此导体的电容则为 1 法拉,简称法,用 F 表示。法拉这一单位太大,常用微法(用符号 μF 表示)或皮法(用 pF 表示)等较小的单位。它们之间的关系为

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

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

孤立导体的电容很小,如果把地球看成半径为 6370km 的孤立导体,它的电容量也不过 $700\mu\text{F}$ 左右。而我们通常生产的 $1000\mu\text{F}/6.3\text{V}$ 铝电解电容器,其尺寸仅为 $\phi 12 \times 30\text{cm}$ 。相比之下孤立导体的电容太小了,没有实用价值。此外,任何实际导体都不可能是孤立的,当它周围有其它物体存在时,此导体的电容就会受影响,使它不能保持恒定。因此,必须设计一种电容量较大,几何尺寸不大而且电容量不受影响的元件,这种元件就称为电容器。

所谓电容器就是由中间夹有电介质的两块金属板构成的元件。当两极板分别带有等量异号的电荷 Q 时,若极间的电位差为 U ,则两者之

比就称为电容器的电容量(或简称容量)。其数值也可用式(1—1)表示。实际上孤立导体的电容就是它和地球所组成的电容器的电容。因为通常假定地球的电位为零,所以孤立导体的电位等于它和地球的电位差。

1.1.2 电容器的标称电容量与允许偏差

每一个电容器上都标有电容量的数值,此电容量称为标称电容量(名义电容量),它与实际电容量之间有一定的差别,称为容量偏差,如果在允许的范围内就称为允许偏差。产生偏差的原因是由于大生产中材料的不均匀性和结构、工艺上的种种因素造成的,即使采用相同的材料和结构、工艺,按容量设计要求生产出来的电容器其容量也具有一定的分散性。为此,在技术条件下规定了“固定式电容器标称容量系列”,实质上这是一合理的优选系列。在大量生产中,只要按此优选系列进行生产,产品中的任何一个电容器都可在合理的范围内根据允许偏差归并到最相近的某一标称容量规格中去。这不仅简化了规格,而且降低了成本。当然,对实际容量与要求容量相差很大的少量产品只表明生产工艺出了问题,一般不会再同时满足产品尺寸、壳号及其它电性能要求,只能作为废品处理。

目前我国采用的固定式标称容量系列(国家标准 GB 2471—81)是按 E24, E12, E6 三个系列所计算出的数值经过修正而得到的一系列优选数值所组成,它们分别适用于允许偏差 $\pm 5\%$ (Ⅰ级), $\pm 10\%$ (Ⅱ级), $\pm 20\%$ (Ⅲ级)的规格。

这三个系列内的数值是按下式计算并经过必要的修正而得,即

E24 系列: $x = \sqrt[24]{10^n}$

式中: $n = 1, 2, 3, \dots, 24$ 。

E12 系列: $x = \sqrt[12]{10^n}$

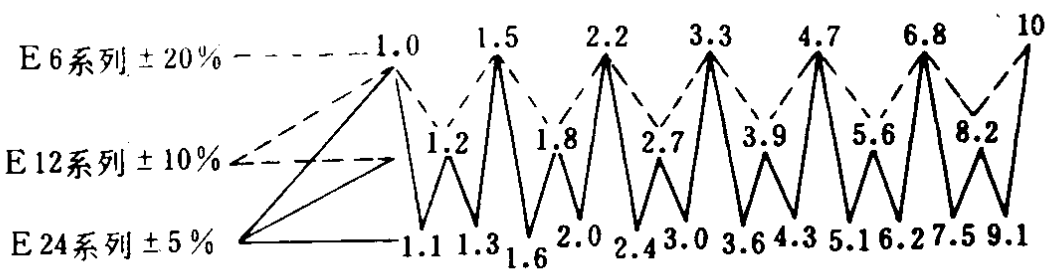
式中: $n = 1, 2, 3, \dots, 12$ 。

E6 系列: $x = \sqrt[6]{10^n}$

式中: $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

以上三个系列的标称值和允许偏差可以按一定的方式排列起来,如表 1—1 所示。

表 1—1 标称电容量与允许偏差



这三个系列标称电容量的特点是系列中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衔接起来(实际上略有重叠或间隙),这就是采用本系列的根本原因。

首先我们分析E6系列,在1.0,1.5,2.2,……,10中任一数值的+20%误差极限必然与下一数值的-20%误差极限衔接起来。如2.2的+20%误差极限为: $2.2+2.2\times0.2=2.64$;而下一数值3.3的-20%误差极限为: $3.3-3.3\times0.2=2.64$,这两个极限正好衔接起来,所以按E6系列的容量标称值其允许偏差为±20%。从1.0~10之间任一电容量值都可以找到某一相应的标称容量,E6系列的上、下极限值见表1—2。

表 1—2 E6 系列上、下极限值(±20%)

E6 系列值	1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8
上极限	0.8	1.2	1.76	2.64	3.76	5.44
下极限	1.2	1.8	2.64	3.96	5.64	8.16

允许偏差±10%的E12系列容量标称值为表1—1中的两行组成,即1.0,1.2,1.5,1.8,……,10。允许偏差为±5%的E24系列是由表1—1中的三行组成,即1.0,1.1,1.2,1.3,1.5,……,10。

由于各类电容器性能和使用要求差别很大,不仅容量范围不同,而且容量的允许偏差也有很大的差异。因此,为了进一步简化品种规格,方便使用,有利生产,在采用上述三个系列的基础上又按不同介质分别

规定了各类电容器的标称容量系列及其允许偏差。

高频(无极性)有机薄膜介质电容器和瓷介电容器、玻璃釉电容器、云母电容器等无机介质电容器的标称容量应符合 E24, E12, E6 系列, 详细内容可参考 GB 2471—81 的规定。

纸介电容器、金属化纸介电容器、纸膜复合介质电容器及低频(极性)有机薄膜介质电容器的标称容量小于或等于 $1\mu\text{F}$ 时, 采用 E6 系列。当其不能满足使用时, 可补充 E12 系列的有关数值。

精密电容器标称容量的数值在 E24 系列不能满足时, 可以采用精密电容器标称容量系列及其允许偏差系列(国家标准 GB 2471—81)。

1.1.3 电容器的电容量与介电常数的关系

电容器的电容量主要决定于它的结构及其所用的介质材料。当平板电容器的极板面积或两极板间的距离改变时, 电容量就要发生变化, 而当改变极板间的介质材料时其电容量也要变化。因此, 电容器的电性能在很大程度上是由选用的介质材料决定的。

1.1.3.1 介质的极化和介电常数

设在两电极间为真空的平板电容器上施加一电压 U , 则极板上的电量很快达到 Q_0 值, 此电容器的电容量 $C_0 = Q_0/U$ 如图 1—1(a)。若将一块结构均匀的电介质嵌入该电容器的极板间如图 1—1(b), 当施加电压 U 不变时, 则极板上的电量由 Q_0 增加到 Q (使用冲击检流计可以测出这种电量的增加), 相应的电容量由 C_0 增加到 C 。为什么介质嵌入前后极板上的电量会发生变化呢? 这是因为在电场作用下嵌入的介质产生了极化现象。介质中原来的一些质点, 例如分子、原子、离子中的正电荷沿电场方向作有限位移, 而负电荷则逆电场方向位移, 介质内产生了感应偶极子。由于介质内单位体积的质点数是如此之多, 使每一质点形成的偶极子都首尾衔接起来, 实际上可看成衔接处的正、负电荷相互抵消。位移的结果只是使介质表面产生感应电荷, 这部分电荷牵制了极板上的一部分自由电荷。使其成为束缚电荷。如果电压 U 不变, 则必须从电源补充一些新的自由电荷来达到平衡, 这样极板上积聚的电荷必然比电极间为真空时增多了, 其中增多的部分电量就等于介质表面产

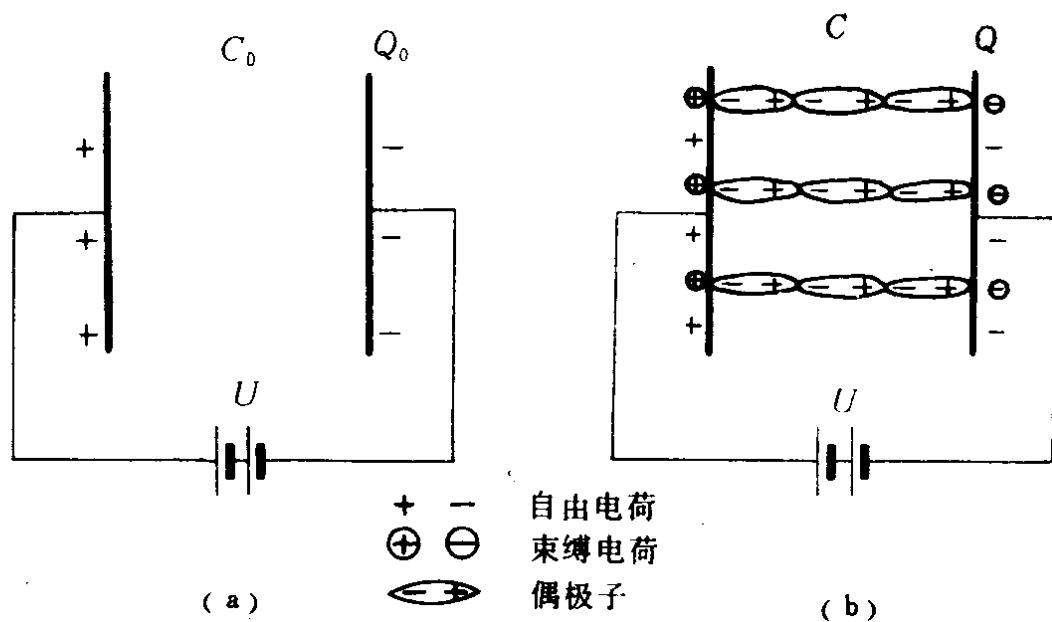


图 1—1 极化与介电常数间的关系模型图

(a)电极间为真空； (b)电极间为电介质

生的感应电量。根据上述情况，我们把介质在电场作用下产生感应电荷的现象称为介质的极化。而 Q/Q_0 可以表示介质极化的程度，称为电介质的介电常数，用 ϵ 表示

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} \quad (1-2)$$

介质嵌入前后平板电容器的电容量由 C_0 增大到 C ，电容量增大的倍数也就是电介质的介电常数 ϵ ，即

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (1-3)$$

介质材料的 ϵ 表示介质在某一电压下束缚电荷增加的能力，是表征介质极化的宏观物理量。因此，电容器电介质的 ϵ 愈大表明了贮存电荷的能力愈强，其电容量相应也愈大。

在上述平板电容器中，当其嵌入不同的电介质时得到不同的电容量，这一事实表明不同的介质具有不同的介电常数。为什么会产生这种现象呢？这是因为电介质的介电常数与其微观结构有关，即不同结构的电介质具有不同的极化形式，表现出不同的介电常数。下面简单分析电

容器中常用电介质材料的主要极化形式及其介电常数随频率变化的一般规律。

1. 1. 3. 2 电子位移极化及其等效电路

当电介质受电场作用时,其电子平均中心相对于核发生位移,形成感应电矩而介质被极化,此种极化称为电子位移极化。它存在于各种结构的电介质中,此种极化建立的速度很快,通常为 $10^{-14} \sim 10^{-15}\text{s}$ 。

众所周知一个平板形电容器其电容量可表示为

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} = \epsilon C_0$$

式中: $C_0 = \epsilon_0 \cdot S/d$; S 为极板面积; d 为极板间的距离; ϵ_0 为真空时的介电常数。

对于一仅具有电子位移极化的非极性介质的电容器的等效电路示于图 1—2。

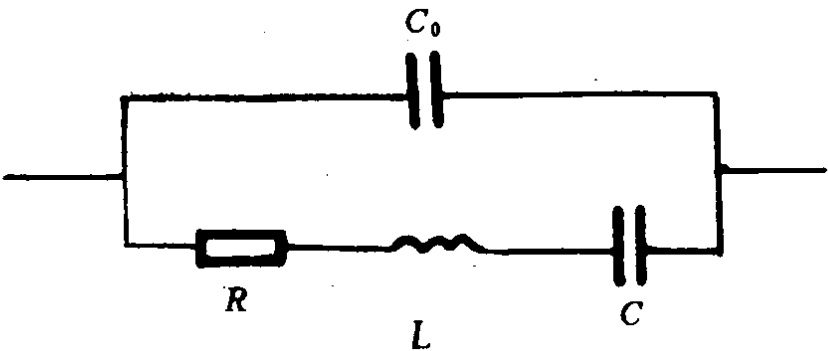


图 1—2 具有非极性介质电容器的等效电路

图中 C_0 表示介质放入之前极板之间的电容量, C 表示放入介质后产生的电容量, R 、 L 分别表示电容器极板和引线引起的电阻和电感。在谐振频率 $f_0(= [2\pi \sqrt{LC}]^{-1})$ 以下时,电容器正常工作,当 R 、 L 很小时其总容量为

$$C_T = C_0 + C$$

当频率接近 ω_0 时, C_T 变得复杂而 C 被含有 R 、 L 和 C 的项所取代。在交流电场作用下该电容器的导纳

$$\begin{aligned} Y &= j\omega C_T = j\omega \epsilon C_0 \\ &= j\omega C_0 \left(1 + \frac{N\alpha_e}{\epsilon_0} \right) \end{aligned} \tag{1—4}$$