

铝电解电容器工程技术

林学清 洪雪宝 编著

厦门大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

铝电解电容器工程技术/林学清,洪雪宝编著. —厦门:厦门大学出版社,2001

ISBN 7-5615-1863-3

I. 铝… I. ①林… ②洪… II. 氧化铝电解-电解电容器-工程技术 IV. TN535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067963 号

厦门大学出版社出版发行

(地址:厦门大学 邮编:361005)

<http://www.xmupress.com>

xmup@public.xm.fj.cn

三明日报社印刷厂印刷

2002年3月第1版 2002年3月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:15.25

字数:384千字 印数:1—2 000册

定价:33.00元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

内容提要

本书系统介绍了铝电解电容器相关的基础理论、制造工艺、工作电解液、设计技术、质量管理、可靠性与失效机理分析、测量技术和原材料检验等内容,全书共分八章。

本书内容丰富,理论紧密联系实际,适用面广,对从事铝电解电容器生产、技术开发的科技人员和管理人员、高等院校相关专业师生以及整机的设计工程师均可作为教材及参考书籍。

序 言

铝电解电容器是电子工程中极为重要的基础电子元件之一。它在电子电路中除了作为滤波、耦合和旁路作用外,还在特殊电路如校正电路、泵电源电路和交流电动机起动电路等中起到特殊的作用。因此,它在通讯设备、视听系统、家用电器和电子仪器仪表等领域中得到广泛的应用。

随着电子技术的高速发展,铝电解电容器朝着小型化、高品质化、固体化和高可靠性方向迅速发展。加之在知识经济发展的今天,更需要不断更新知识和创新技术,以增强市场竞争能力。

铝电解电容器是一门有着与之相关的基础理论和工程技术紧密相结合的交叉学科,它涉及到无线电技术、物理化学、有机化学、固体物理学和材料科学等多学科知识。为了使广大读者能掌握好这门学科技术,作者总结多年教学、科研、生产的实践经验和成果,并以国内外最新科技成果充实本书内容,力求反映目前国内外的先进水平。本书共分为八章。第一章铝电解电容器电气特性,介绍铝电解电容器的电气性能参数、等效电路分析等。第二章铝金属的结构、腐蚀和形成,介绍铝金属结构性能、铝箔的腐蚀和形成机理。第三章制造工艺与质量管理,介绍刺铆、卷绕、装配和老练分选等工艺技术及质量管理。第四章工作电解液的基本理论与实践。此章系本书重点,主要介绍工作电解液的电离理论、溶剂化效应,电解液用的溶剂、酸、碱和特殊添加剂的物化性能及其对电容器性能的影响,工作电解液配方精选 80 例和电解质的最新进展。第五章设计技术,重点介绍铝电解电容器的结构设计与计算(列举 9 种典型铝电解电容器的设计与计算)、电解电容器新技术和发展新动向。第六章测量技术,介绍铝电解电容器的 C 、 $\text{tg}\delta$ 、 I_{LC} 、 Z 参数以及温度频率特性的测量。第七章可靠性和失效机理分析,重点分析产品的可靠性及失效机理、寿命的推算等。第八章主要原材料、零部件及检验方法,详细介绍主要原材料——铝箔、电解纸、封口橡皮塞、铝壳、引线、热收缩塑料套管以及各种主要化学试剂(如乙二醇、己二酸铵、甲酸铵、癸二酸铵等)的检验方法。

铝电解电容器结构极为特殊,其阴极为特殊制造的“电解质”,它与产品品质的优劣、产品新颖性等密切相关,并且工作电解质的配方及配制技术是属专有技术,当属于电子元件的高新技术产业。

作者希望通过本书能对我国从事铝电解电容器生产的管理人员、科技人员以及高等院校电子元件专业的师生有所帮助,为促进我国电解电容器事业的发展贡献一份力量。

本书承蒙福建省科学技术厅、厦门大学出版社和厦门乐穗电容器有限公司刘本尧先生的支持和帮助,作者在此一并表示诚挚的谢意。

由于笔者水平所限和编写时间仓促,书中难免存在错误与不足之处,希望得到专家与读者的批评指正。

作 者

2001年2月于厦门

目 录

序言

第一章 铝电解电容器电气特性	(1)
§ 1 铝电解电容器的一般概念.....	(1)
1.1 电容器的定义	(1)
1.2 铝电解电容器的结构特点	(2)
1.3 电气性能特点	(3)
1.4 电气参数与标称系列	(4)
§ 2 铝电解电容器的等效电路分析.....	(5)
2.1 电容器介质的串联和并联等效电路	(5)
2.2 铝电解电容器的等效电路	(7)
§ 3 铝电解电容器的主要电气参数分析.....	(8)
3.1 阻抗、电容量、损耗角正切和等效串联电阻的关系	(8)
3.2 温度频率特性	(8)
3.3 漏电流及抑制漏电流回升的对策.....	(10)
§ 4 铝电解电容器的附生电容量及其影响	(13)
4.1 阴极容量的产生及其影响.....	(13)
4.2 减少附生电容量影响的措施.....	(14)
§ 5 铝电解电容器允许纹波电流的分析	(14)
5.1 承受纹波电压能力的分析.....	(14)
5.2 允许纹波电流和允许温升的推算.....	(15)
5.3 纹波电流的修正系数.....	(16)
§ 6 铝电解电容器使用注意事项	(18)
6.1 使用时注意事项.....	(18)
6.2 安装时注意事项.....	(18)
第二章 铝金属的结构、腐蚀和形成	(19)
§ 1 铝金属的晶体结构与物理化学性质	(19)
1.1 铝金属的物理通性.....	(19)
1.2 铝金属的晶体结构.....	(20)
1.3 铝金属的物理化学性质.....	(21)
1.4 高纯度铝箔及铝合金箔.....	(24)
1.5 铝材加工工艺.....	(26)
§ 2 铝箔腐蚀	(27)
2.1 腐蚀机理.....	(27)

2.2	腐蚀工艺分析	(30)
2.3	影响腐蚀因素的分析	(32)
§ 3	铝箔的形成	(34)
3.1	阳极氧化膜形成机理及铝氧化膜的性质	(34)
3.2	形成工艺分析	(39)
3.3	影响形成因素的分析	(43)
第三章	制造工艺和质量管理	(44)
§ 1	制造工艺简要流程	(44)
§ 2	纯水的制取	(45)
2.1	纯水制取方法	(45)
2.2	离子交换法制备去离子水	(45)
2.3	再生处理	(47)
2.4	水质的检验	(48)
§ 3	刺铆工艺	(49)
3.1	刺铆工艺和技术要求	(49)
3.2	品质检验	(51)
§ 4	芯子卷绕	(52)
4.1	卷绕工艺和技术要求	(52)
4.2	品质检验	(52)
§ 5	芯子浸渍	(53)
5.1	浸渍方法	(53)
5.2	浸渍工艺的技术要求	(53)
§ 6	装配工艺	(54)
6.1	工艺和技术要求	(54)
6.2	品质检验	(55)
§ 7	老练与分选	(55)
7.1	老练工艺	(55)
7.2	老练电路原理	(57)
7.3	老练工艺中若干问题的讨论	(57)
7.4	分选	(57)
§ 8	清洗工艺	(58)
8.1	引线清洗	(58)
8.2	产品清洗	(58)
8.3	铝壳清洗	(58)
8.4	封口橡皮塞清洗	(58)
§ 9	印刷套管	(58)
9.1	油墨和稀释剂	(59)
9.2	印刷	(61)
9.3	塑料套管印刷的质量问题及其对策	(62)
§ 10	质量管理	(62)

10.1	质量管理常用的几种分析方法	(62)
10.2	生产工序的品质管理	(66)
第四章	工作电解液的基本理论与实践	(68)
§ 1	电离理论	(68)
1.1	电离理论的进展	(68)
1.2	电解质的分类	(69)
§ 2	溶剂化作用	(70)
2.1	分子间的力	(70)
2.2	分子间的作用力对物质的某些物理性质的影响	(73)
2.3	溶剂的分类	(75)
2.4	溶剂化效应的特性	(77)
§ 3	电解质溶液的电导理论	(77)
3.1	电解质溶液的电导率	(77)
3.2	摩尔电导	(77)
3.3	浓度、温度和压力对电解质溶液电导的影响	(78)
3.4	电解质溶液中离子的迁移性	(79)
§ 4	电解质溶液的依数性	(81)
4.1	蒸气压下降	(81)
4.2	溶液沸点上升	(82)
4.3	溶液凝固点下降	(82)
4.4	电解质溶液依数性的修正	(83)
§ 5	工作电解液用的溶剂	(84)
5.1	工作电解液对溶剂的基本要求	(84)
5.2	几类常用有机溶剂的性质	(85)
§ 6	工作电解液用的酸及其盐	(93)
6.1	硼酸及其盐	(93)
6.2	羧酸及其盐	(94)
§ 7	工作电解液用的碱	(100)
7.1	氨和氨水	(100)
7.2	胺	(101)
§ 8	工作电解液用的添加剂	(103)
8.1	消氢剂	(103)
8.2	耐卤代烃溶剂清洗的添加剂	(105)
8.3	阻化剂	(106)
8.4	漏电流抑制剂和低漏剂	(107)
8.5	提高闪火电压的添加剂	(107)
8.6	提高形成特性的添加剂	(108)
§ 9	工作电解液中的水	(109)
9.1	水的结构与性质	(109)
9.2	工作电解液中水的来源及作用机理	(110)

9.3	含水工作电解液的利弊	(111)
§ 10	工作电解液基本参数的测量	(112)
10.1	电阻率 ρ	(112)
10.2	pH 值	(113)
10.3	闪火电压 U_s	(113)
10.4	氧化效率 η	(113)
10.5	饱和蒸气压 P_s	(114)
§ 11	工作电解液配制技术	(115)
11.1	配制技术	(115)
11.2	正交试验法	(116)
§ 12	工作电解液精选 80 例	(125)
12.1	低压电解电容器用工作电解液	(125)
12.2	中高压电解电容器用工作电解液	(128)
§ 13	工作电解质的新进展	(132)
13.1	工作电解液发展历程	(132)
13.2	有机高分子固体电解质	(134)
第五章	设计技术	(136)
§ 1	结构设计与计算	(136)
1.1	外形尺寸的确定	(136)
1.2	铝电解电容器芯子尺寸的计算	(136)
1.3	铝箔的选择	(140)
1.4	电解纸的选择	(141)
1.5	零部件的选择	(143)
§ 2	几种类型铝电解电容器的典型设计	(143)
2.1	音响用铝电解电容器的设计	(144)
2.2	耐高纹波电流铝电解电容器的设计	(148)
2.3	充放电用铝电解电容器的设计	(148)
2.4	宽温铝电解电容器的设计	(149)
2.5	低漏电流铝电解电容器的设计	(150)
2.6	双极性铝电解电容器的设计	(152)
2.7	S 校正用铝电解电容器的设计	(153)
2.8	枕形失真校正电路用铝电解电容器的设计	(154)
2.9	交流电动机用铝电解电容器的设计	(155)
§ 3	电解电容器新技术与发展新动向	(156)
3.1	超小型化	(156)
3.2	元件片式化	(156)
3.3	宽温长寿命化	(159)
3.4	有机高分子固体电解质铝电解电容器	(160)
第六章	电气参数测量技术	(162)
§ 1	铝电解电容器的主要参数及其测量方法	(162)

1.1	电解电容器电容量和损耗角正切的测量	(162)
1.2	漏电流的测量	(163)
1.3	阻抗的测量	(164)
§ 2	温度、频率特性的测量	(165)
2.1	温度特性的测量	(165)
2.2	频率特性的测量	(166)
§ 3	铝电解电容器的防爆试验	(166)
3.1	概况	(166)
3.2	介绍几种防爆试验标准	(167)
第七章	可靠性和失效机理分析	(169)
§ 1	可靠性	(169)
1.1	可靠性的基本概念	(169)
1.2	可靠性指标	(169)
1.3	可靠性试验	(176)
§ 2	失效机理分析	(181)
2.1	失效机理分析的目的和内容	(181)
2.2	主要失效模式和失效机理	(182)
2.3	几种典型的失效机理分析	(182)
2.4	寿命及推算	(187)
第八章	主要原材料、零部件及检验方法	(189)
§ 1	铝箔及检验方法	(189)
1.1	铝箔	(189)
1.2	铝箔的检验方法	(190)
§ 2	电解纸及检验方法	(195)
2.1	电解纸	(195)
2.2	电解纸的检验项目和方法	(198)
§ 3	封口橡皮塞及检验方法	(201)
3.1	有机高聚物的橡胶及性质	(201)
3.2	封口橡皮塞	(203)
3.3	封口橡皮塞的检验方法	(205)
§ 4	热收缩塑料套管及检验方法	(207)
4.1	热收缩塑料套管	(207)
4.2	热收缩塑料套管的检验方法	(208)
§ 5	引线及检验方法	(209)
5.1	引线	(209)
5.2	引线的检验方法	(210)
§ 6	铝壳及检验方法	(211)
6.1	铝壳	(211)
6.2	铝壳的检验方法	(212)
§ 7	主要化学试剂及检验方法	(213)

7.1	乙二醇	(213)
7.2	N,N-二甲基甲酰胺	(217)
7.3	五硼酸铵	(218)
7.4	己二酸铵	(220)
7.5	癸二酸铵	(222)
7.6	苯甲酸铵	(224)
7.7	甲酸铵	(226)
参考文献		(228)

第一章 铝电解电容器电气特性

§ 1 铝电解电容器的一般概念

1.1 电容器的定义

电容器的物理概念就是由两个导电极板,中间放置着具有介电特征的物质所组成的分立元件。这里所指具有介电特征的物质在电气工程上称之为绝缘材料,物理学上则以电介质表示,而在电容器行业中则称为介质。

设一平板形电容器的结构如图 1-1 所示,若电容器的电容量为 C 、极板面积为 S 、介质的电容率为 ϵ 以及介质厚度为 d ,并使两极板分别带 $+Q$ 和 $-Q$ 电荷,则单位面积上的电量 $\sigma = Q/S$ 。按物理静电学的基本公式,两极板间的介质电场强度:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon_r} = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon_r S} \quad (1-1)$$

式中 ϵ_0 —真空电容率;

ϵ_r —相对电容率。

并且把相对电容率 ϵ_r 与真空电容率 ϵ_0 的乘积叫做电容率 ϵ ,即 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 。

因为 $U = Ed, C = Q/U$,则:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{Ed} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad \text{F}$$

式中 U 为施加电压,单位为 V。若 S 以 cm^2 计, d 以 cm 计,而 ϵ_0 对于真空来说:

在静电单位制中 $\epsilon_0 = 1$

在实用单位制中

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^{11}} = \frac{1}{3.6\pi} \times 10^{-12} \quad \text{F/cm}$$

代入上式则得工程上常用的平板形电容器电容量关系式:

$$C = \frac{\epsilon_r S}{3.6\pi d} \times 10^{-6} \quad \mu\text{F} \quad (1-2)$$

或

$$C = \frac{\epsilon_r S}{3.6\pi d} \quad \text{pF}$$

式中: S 为电极极板的有效表面积, cm^2 ;

d 为电介质厚度,即两极板间的距离, cm 。

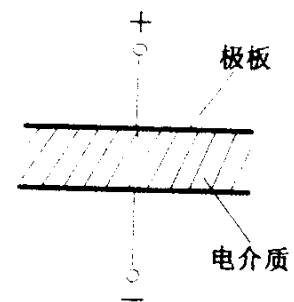


图 1-1 平板形电容器结构示意图

电容量的单位,在实用单位制中为法拉(F)。在使用时以法拉为单位太大,使用不方便,常用微法(μF)或皮法(pF),它们之间的关系是: $1\text{ F}=10^6\ \mu\text{F}=10^{12}\ \text{pF}$ 。

关于电容率(permittivity)这一物理学名词的概念,这里有必要作一介绍:

电容率是按1996年全国自然科学名词审查委员会公布的物理学名词。在工程技术中通常是用相对电容率来描述电介质的介电性能,目前在一些书籍和资料中,往往不加“相对”二字而用“电容率”表示,其实这里的“电容率”就是泛指相对电容率。除空气的相对电容率近似等于1外,其他电介质的相对电容率均大于1。在国际单位制中相对电容率无量纲,而真空电容率有量纲(F/m)。再者,过去 ϵ 、 ϵ_0 和 ϵ_r 习惯上分别称之为介电常数、真空介电常数和相对介电常数,这些均为不推荐用名。

此外,从物理静电学的观点来看,电容器顾名思义是具有储能的功能,它储存电能 W 为:

$$W = \frac{1}{2}UQ = \frac{1}{2}CU^2$$

例:一平板电容器,电极表面积为 2 cm^2 ,介质厚度为 0.2 mm ,相对电容率为8.4。求该电容器的电容量。

解:按公式(1-1)计算:

$$C = \frac{\epsilon_r S}{3.6\pi d} \times 10^{-6} = \frac{8.4 \times 2}{3.6 \times 3.14 \times 0.02} \times 10^{-6} = 74.31 \times 10^{-6} \mu\text{F} \cong 74\ \text{pF}$$

在电容器中有一类结构较为特殊的称之为电解电容器。所谓电解电容器,就是两个极板有阳(正)极和阴(负)极之分,其中作为阳极的是采用特定的阀金属,并在该金属表面上藉助于电化学方法生成一极薄且具有单向导电性的氧化膜作为介质,而阴极通常是采用能生成和修复介质氧化膜的液状或固状的电解质,这样一种特殊结构和特殊工艺制造的电容器。这里所指特定阀金属,是指像铝、钽、铌和钛等之类的金属,因为其生成的金属氧化物 Al_2O_3 、 Ta_2O_5 、 Nb_2O_5 和 TiO_2 ,它们都具有单向导电性。

电解电容器种类繁多,因此,其分类可以从不同角度来进行:

- (1)按阀金属种类分类:有铝电解电容器、钽电解电容器和钽铌合金电解电容器等。
- (2)按电解质状态分类:有液体(湿式)电解电容器和固体电解电容器。
- (3)按阳极呈现的状态分类:有箔式卷绕型电解电容器和烧结型电解电容器。

当然,也可以按用途、工作环境、性能来分类。本书主要讲述用途最广的通用型箔状湿式铝电解电容器。

1.2 铝电解电容器的结构特点

通用型铝电解电容器的基本结构是箔式卷绕型的结构,如图1-2所示。阳极为铝金属箔,介质是用电化学方法在阳极金属箔表面上形成的阀金属氧化膜 Al_2O_3 ,阴极则为多孔性电解纸所吸附的工作电解质,这样使铝电解电容器在结构上有着与众不同之处。

它与其他类型电容器如陶瓷介质电容器、有机薄膜电容器的结构相比较,有以下显著不同之处:

- (1)电解电容器的两个导电极板有正负极之分。
- (2)电解电容器的介质是利用电化学方法,在腐蚀过的阳极铝箔表面上生成一层极薄的,约 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 的铝氧化膜作为电容器的电介质,它与铝阳极结合为一整体。
- (3)电解电容器的阴极是电解质。电解质根据其物理状态可分为液体电解质、半液体(糊

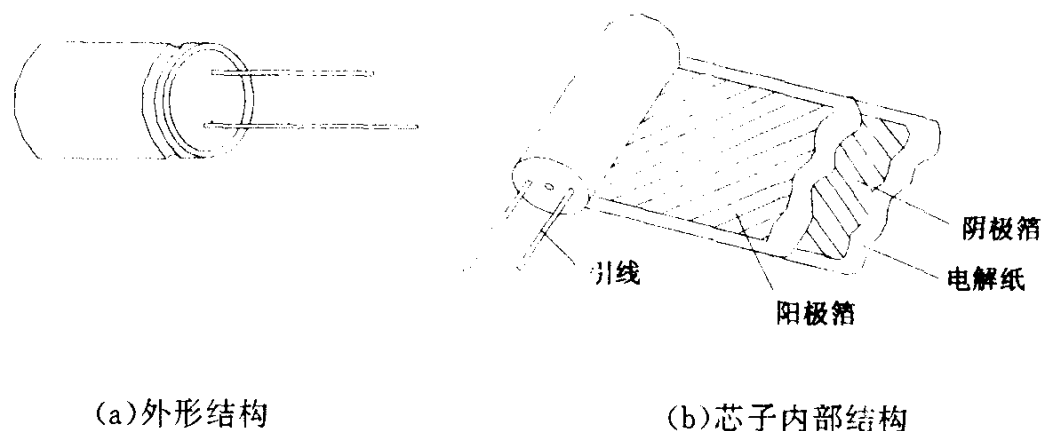


图 1-2 通用箔式卷绕型铝电解电容器结构

状,凝胶状)电解质和固体电解质。为了使电容器的阴极与外电路相接,必须从结构上加一阴极引出线(板)成为一完整的结构。电容器中的电解纸是起吸附工作电解液和衬垫隔离作用。

电解电容器由于自身结构的特点,决定这类电容器在性能方面有其独特的优点,但同时也带来一些不可避免的缺点。

1.3 电气性能特点

电解电容器与有机介质电容器、无机介质电容器相比较,它在电性能上有如下显著特点:

(1)比率电容量大。即单位体积所具有的电容量很高,若以 $V(\text{cm}^3)$ 表示产品体积, $C(\mu\text{F})$ 表示电容量,则比率电容量为:

$$C_{\text{比率}} = \frac{C}{V} \quad \mu\text{F}/\text{cm}^3 \quad (1-3)$$

比率电容大,这意味着在相同电容量下,产品具有更小的体积,有利于产品的小型化。

(2)介质氧化膜(Al_2O_3)能承受极高的工作电场强度。若以 U 表示工作电压, d 表示介质氧化膜厚度,则其工作电场强度 $E_{\text{工作}}$ 为:

$$E_{\text{工作}} = \frac{U}{d} \quad \text{V}/\text{mm} \quad (1-4)$$

Al_2O_3 介质膜 $E_{\text{工作}}$ 一般约为 $600 \text{ kV}/\text{mm}$;而纸介电容器的浸渍纸的电场强度约为 $200 \sim 300 \text{ kV}/\text{mm}$,制约着电容器只能承受 $10 \sim 20 \text{ kV}/\text{mm}$;高频陶瓷介质也只能承受 $20 \sim 30 \text{ kV}/\text{mm}$ 。有这样高的工作电场强度,才有可能较其他类型电容器在小型化方面,提供充分又必要的前提条件。铝电容器的介质氧化膜的高工作电场强度与其致密的 Al_2O_3 膜的结构有关。

(3)具有自愈作用。顾名思义指铝电解电容器在工作之中,依赖于工作电解质提供氧的负离子(O^{2-}),能自动修补 Al_2O_3 膜中的疵点、缺陷,使得该处的绝缘性能随时得到修补和改善,提高了产品耐电压特性。

铝电解电容器除了上述的优点之外,也由于自身结构特点而带来一些缺点:

(1)工作电压上限值受到一定限制。对于铝电解电容器来说,工作电压最高为 500 V 左右。

(2)具有单向导电性。普通铝电容器的两个电极是有极性的,其阳极要接到电路中的正极,阴极接到电路的负极,不能接反使用。

(3)绝缘质量较差。衡量电解电容器绝缘质量的优劣,不是像陶瓷介质和有机介质电容器那样采用绝缘电阻或时间常数($\tau = CR$)来表示。由于电解电容器绝缘性能较差,一般以漏电流 I_{LC} 来表示。造成绝缘质量较低的原因在于,其极薄的介质氧化膜是通过电化学方法来制备的,

性能极易受原材料的纯度、工艺因素和工艺卫生等因素的影响而变化。

(4)非固体电解质铝电解电容器的电性能,在长期贮存或长期负荷工作下,工作电解液将会逐渐枯干和变质,而导致电性能下降,特别是久存不用后,介质氧化膜局部绝缘性能变差,若突然施加额定工作电压,易导致电容器损坏,甚至防爆阀开阀而失效。

此外,铝电解电容器的损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 较大,温度频率特性也差些。

1.4 电气参数与标称系列

铝电解电容器常用标称电容量 C_R 、损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 、漏电流 I_{LC} 、额定工作电压 U_R 和阻抗 Z 这五大参数来表征其常规的电气性能。

(1)标称电容量与电容量允许偏差

一般地说,所谓标称电容量是指在电容器上标明的电容量值,是设计容量的名义值。它与实际制造出来的电容器的电容量之间有一定偏差,这偏差称之为电容量允许偏差。产生偏差的原因是由于原材料的不均匀性以及结构、工艺波动等因素造成的。

铝电解电容器标称电容量值是按照 E_6 系列:

$$X = \sqrt[6]{10^n} = 10^{\frac{n}{6}} \quad (1-5)$$

式中: $n=1,2,3,4,5,6$, 并为正整数。

按 E_6 系列,在 1.0,1.5,2.2,3.3,4.7,6.8...10 中任一数值的 +20% 误差极限必然与上一数值的 -20% 误差极限相衔接。这点给生产带来极大便利,即生产出某一电容量的产品,必然落入某一标称电容量范围内。电容量允许偏差的优先值如表 1-1。

表 1-1 允许偏差与文字符号

允许偏差/%	±10	±20	-10~+30	-10~+50	-10~+75	-10~+100
文字符号	K	M	Q	T	U	R

(2)损耗角正切

用于脉动电路中的铝电解电容器,实际上要消耗一小部分有功的电功率,这可用损耗角正切来表征,它是电容器电能量损耗的有功功率与无功功率之比。对于电解电容器较常采用串联等效电路,如图 1-3 所示,则其损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 为:

$$\text{tg}\delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I r}{I \frac{1}{\omega C_r}} = \omega C_r r \quad (1-6)$$

(3)漏电流

漏电流 I_{LC} 是电解电容器五大电参数之一,用来表征电解电容器的绝缘质量。它与施加电压的大小、环境温度的高低和测试时间的长短都有密切关系,故在规定漏电流值时必须标明其测试时间 t 、施加电压 U 和环境温度 T 的大小。 I_{LC} 与测试时间(即施加电压时间)、施加电压大小和环境温度之间的关系如图 1-4 所示。

对于铝电解电容器,漏电流通常用下式表示:

$$I_{LC} = KCU + M \quad \mu\text{A} \quad (1-7)$$

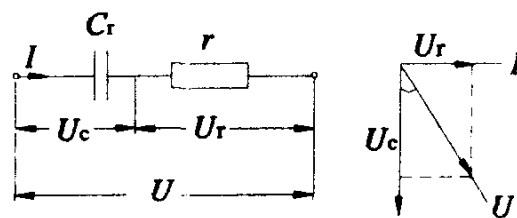


图 1-3 等效串联电路和电流电压矢量图



图 1-4 电解电容器的漏电流与测试时间、施加电压和环境温度的关系

式中： C —电容器的标称电容量， μF ；

U —额定工作电压， V ；

K, M —常数。

其中 K 值，称之为漏电流常数。对于不同类型的电解电容器具有不同值，如 CD11 型产品， $K=0.03$ ；CD110 型产品， $K=0.01$ ；低漏电流产品， $K=0.001\sim 0.002$ 。

对于 M 值，除了主要考虑氧化膜本身漏电流外，还应考虑到电容器表面漏导电流的影响。 M 值主要取决于产品结构和 CU 值的大小。对于 CU 值较小者，其表面漏导电流影响较大， M 值也相应附加一较大值；对于 CU 值较大者，表面漏导电流影响就较小， M 值可以忽略不计。所以 M 值可以在 $0\sim 20$ 范围内取值。

(4) 额定工作电压 (U_R)

它指在下限类别温度和额定温度之间的任一温度下，可以连续施加在电容器的最大直流电压或最大交流电压有效值或脉冲电压的峰值。

对于电解电容器的额定电压值系列由下列数值组成：

4、0、6、3、10、16、25、35、50、63、100、160、200、250、350、400、450、500，其单位为伏 (V)。

(5) 阻抗 (Z) 将由 § 3 节 3.1 解释。

§ 2 铝电解电容器的等效电路分析

为了分析铝电解电容器的电气特性，特别是电容量 C 、损耗角正切 $\text{tg}\delta$ 、阻抗 Z 与温度 T 、频率 f 的相互关系，以及这种相互关系又与铝电解电容器本身结构有着密切和复杂的依存关系，这就有必要用等效电路加以分析。

2.1 电容器介质的串联和并联等效电路

为了搞清铝电解电容器的等效电路，首先要了解电容器介质的串联电路和并联电路关系。铝电解电容器的介质是 Al_2O_3 膜。由电介质理论得知，介质在电场作用下将产生介质极化，它对介质的电容率 ϵ 有贡献，当它构成一电容器时，就有电容量 C 存在。同样，介质也存在损耗，并以损耗电阻表示。若要表示电容器介质上述的这种作用，可用并联或串联等效电路表示，即如图 1-5 所示。

应该指出，代表损耗的电阻在两种等效电路中其意义是不同的，其数值大小也是截然两样的。在图 1-5(a) 的并联等效电路中，代表介质损耗的电阻可看作漏导电阻， R 值应很大，而在图 1-5(b) 串联等效电路中实际表征为介质能量损耗电阻，故 r 值应很小。由图 1-5 中的电流电压