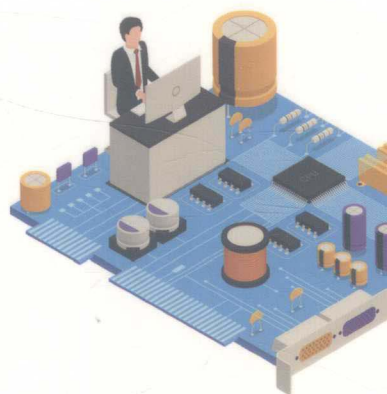


- 主题均与工作息息相关
- 使用基础且本质的分析方法
- 行文诙谐，深入浅出
- 图文并茂，叙述详尽



电子工程师成长之路

# 电容应用分析精粹

## 从充放电到

# 高速 PCB 设计

◎ 龙 虎 著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

电子工程师成长之路

# 电容应用分析精粹

## 从充放电到高速 PCB 设计

龙 虎 著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了电容器的基础知识及其在各种实际应用电路中的工作原理,包括 RC 积分、RC 微分、滤波电容、旁路电容、去耦电容、耦合电容、谐振电容、自举电容、PN 结电容、加速电容、密勒电容和安规电容等。

本书强调工程应用,包含大量实际工作中的应用电路案例讲解,涉及高速 PCB、高频电路、运算放大器、功率放大、开关电源等多个领域,内容丰富实用,叙述条理清晰,对工程师系统掌握电容器的实际应用有很大的帮助,可作为初学者的辅助学习教材,也可作为工程师进行电路设计、制作与调试的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电容应用分析精粹:从充放电到高速 PCB 设计/龙虎著. —北京:电子工业出版社,2019.3

(电子工程师成长之路)

ISBN 978-7-121-34936-2

I. ①电… II. ①龙… III. ①电容器-电路设计-计算机辅助设计 IV. ①TM530.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 196843 号

策划编辑:张迪(zhangdi@phei.com.cn)

责任编辑:张迪

印刷:山东华立印务有限公司

装订:山东华立印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:441 千字

版次:2019 年 3 月第 1 版

印次:2019 年 3 月第 1 次印刷

定价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254469; zhangdi@phei.com.cn。

## 作者序

本书有少部分章节内容最初发布于个人微信公众号“电子制作站”(dzzzzcn),并得到广大电子技术爱好者及行业工程师的一致好评,甚至在网络上被大量转载。考虑读者对电容器应用知识的强烈诉求,决定将电容器相关的文章整合成图书出版,书中每章几乎都有一个鲜明的主题,且与实际工作息息相关。本书将已发布章节收录的同时,也进行了细节更正及内容扩充,当然,更多的章节是最新撰写的,它们对读者系统且深刻地理解电容器应用具有非常实用的价值。

从写作的角度来看,越是简单的知识越不容易写得出彩,很多看似很简单的内容要以图文方式形象阐述,并能将自己的理解百分百地轻松传递给读者真心不是一件容易的事。换言之,读者阅读越轻松、越觉得精彩、越想看后续章节,作者需要花费的心思就越多。这并非从网络上直接复制那么简单。无论是在素材、作图和技术功底还是在行文思路、语言组织和逻辑能力上,都是极大的挑战。因此,按照什么样的思路来整合图书一直很伤脑筋,而我又从来不愿意机械式地堆砌电路图,这对购买本书的读者也是极为不尊重的。

本书首先用几章内容介绍电容器的基础知识,这也是全书最为重要的部分,因为我在写作时始终会强调基础的重要性,很多知识点在同类图书中未曾涉及,或一笔带过语焉不详,但对于深刻理解电容器原理及其应用却有着非凡的意义。之后对电容器的充放电特性进行详细介绍,同时讲解一些相关的经典应用电路,其分析过程甚至达到啰唆的程度。然而,你绝对不会认为这是在浪费时间。最后花费大量章节对电容器的各种实际应用进行重点阐述,如滤波电容、旁路电容、去耦电容、耦合电容、谐振电容、PN结电容、密勒电容、加速电容、自举电容等,所有这些内容你都有可能会在实际工作中遇到(或已经遇到过),届时可以翻翻这本书,相信会有意想不到的惊喜。

对于高速PCB、高频电路、功率放大、运算放大、开关电源等很多领域乍看起来很深奥的技术问题,本书都试图从电容器最基本的特性进行原理性讲解,让读者从技术源头理解“为什么”,让深奥的问题变得通俗易懂,然则并不浅显。在进行文字组织时,尽量使用诙谐幽默的行文方式,并配合丰富图文与Multisim仿真讲解相关主题,使读者能够在轻松的气氛下学习技术知识,目的只有一个:让原来不太懂的轻松读懂,已懂的更形象地读懂,让读者有“原来技术也可以这样学”的感觉,让读者感到技术学习不是枯燥无味的,而可以是一个非常有趣的过程。

由于作者水平有限,错漏之处在所难免,恳请读者批评与指正。



# 目 录

第 1 章	电容器基础知识 .....	1
第 2 章	电容器标称容值为什么这么怪 .....	9
第 3 章	电容器为什么能够储能 .....	16
第 4 章	介电常数是如何提升电容量的 .....	21
第 5 章	介质材料是如何损耗能量的 .....	28
第 6 章	绝缘电阻与介电常数的关系 .....	33
第 7 章	电容器的失效模式 .....	39
第 8 章	RC 积分电路的复位应用 .....	40
第 9 章	门电路组成的积分型单稳态触发器 .....	46
第 10 章	555 定时芯片应用：单稳态负边沿触发器 .....	50
第 11 章	RC 多谐振荡器电路工作原理 .....	59
第 12 章	这个微分电路是冒牌的吗 .....	62
第 13 章	门电路组成的微分型单稳态触发器 .....	67
第 14 章	555 定时器芯片应用：单稳态正边沿触发器 .....	71
第 15 章	电容器的放电特性及其应用 .....	77
第 16 章	施密特触发器构成的多谐振荡器 .....	82
第 17 章	电容器的串联及其应用 .....	87
第 18 章	电容器的并联及其应用 .....	92
第 19 章	电源滤波电路基本原理 .....	96
第 20 章	从低通滤波器认识电源滤波电路 .....	100
第 21 章	从电容充放电认识低通滤波器 .....	105
第 22 章	降压式开关电源中的电容器 .....	108
第 23 章	电源滤波电容的容量越大越好吗 .....	117
第 24 章	电源滤波电容的容量多大才合适 .....	124
第 25 章	RC 滞后型移相式振荡电路 .....	127
第 26 章	电源滤波电容中的战斗机：铝电解电容 .....	130
第 27 章	旁路电容工作原理（数字电路） .....	135
第 28 章	旁路电容 0.1 $\mu\text{F}$ 的由来（1） .....	145
第 29 章	旁路电容 0.1 $\mu\text{F}$ 的由来（2） .....	150
第 30 章	旁路电容的 PCB 布局布线 .....	155
第 31 章	PCB 平面层电容可以做旁路电容吗 .....	164
第 32 章	旁路电容工作原理（模拟电路） .....	166
第 33 章	旁路电容与去耦电容的联系与区别 .....	169



第 34 章	旁路电容中的战斗机：陶瓷电容	175
第 35 章	交流信号是如何通过耦合电容的	179
第 36 章	为什么使用电容进行信号的耦合	184
第 37 章	耦合电容的容量多大才合适	190
第 38 章	RC 超前型移相式振荡电路	194
第 39 章	超前滞后相移应用：RC 文氏电桥	196
第 40 章	单电源运放电路中的隔直耦合电容	201
第 41 章	RLC 串联谐振基本原理	208
第 42 章	电感储存的能量是什么	214
第 43 章	谐振状态中磁与电是如何转化的	221
第 44 章	RLC 并联谐振应用：电容三点式振荡	229
第 45 章	晶振中的串联与并联谐振	236
第 46 章	PN 结电容的实际应用与影响	241
第 47 章	使用加速电容优化开关电路的速度	247
第 48 章	密勒电容对电路高频特性的影响	251
第 49 章	功放与开关电源中的自举电容	257
第 50 章	安规电容工作原理及应用	265

# 第 1 章 电容器基础知识

电容器 (Capacitor) 是一种可以储存一定电荷量的元器件, 在实际工作中也经常使用“电容”作为简称。当电荷在电场中受力迁移时, 如果两个导体之间有电介质材料阻碍电荷移动, 就会使得电荷累积储存在导体上, 我们把这两个导体能够储存的电荷量称为电容量 (Capacitance)。

(也有将电容量简称为“电容”的说法, 但本书的行文习惯约定: “电容”即代表“电容器”, “容量”即代表“电容量”。例如, 在实际工作中, 我们很少会这样说: “这个电容器的电容 (量) 是  $10\mu\text{F}$ ”, 反而以这种形式居多: “这个电容的容量是  $10\mu\text{F}$ ”。)

电容器是电子产品中应用最为广泛的基础元器件之一, 通常在原理图设计中使用字母“C”作为位号标记, 其对应的原理图符号有很多, 常用符号如图 1.1 所示。

其中,  $C_1$  表示固定无极性电容器;  $C_2$  表示固定有极性电容器;  $C_3$  表示无极性微调电容器;  $C_4$  表示无极性可调电容器。

任意两个导体都可以构成一个电容器, 两块相互绝缘的平行金属板就构成了一个最简单的、经典的平行板电容器, 如图 1.2 所示。



图 1.1 常用电容器原理图符号

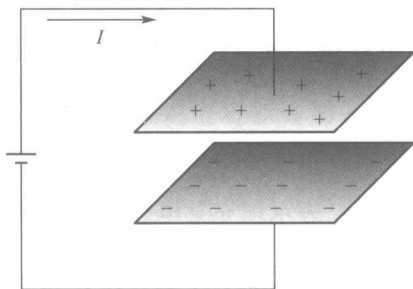


图 1.2 平行板电容器

当直流电压施加在两块平行板上时, 正电荷与负电荷将分别聚集在平行板的两个极板上, 这就是电容器储存电荷最基本的原理, 而这个平行板储存电荷的能力大小就是我们一开始提到的 (电) 容量, 它可由下式计算获得:

$$C = \epsilon \times \frac{S}{D}$$

其中,  $S$  表示两块平行板的相对面积;  $D$  表示两块平行板之间的垂直距离;  $\epsilon$  表示平行板之间填充物质 (电介质, Dielectric) 的介电常数 (Permittivity), 如图 1.3 所示。

需要注意的是: 公式里的  $S$  指的是相对面积, 如图 1.4 所示。

尽管  $S_2$  比  $S_1$  大很多, 但是相对面积却只有  $S_1$ 。因此, 该平行板电容器的有效面积将由  $S_1$  来决定。

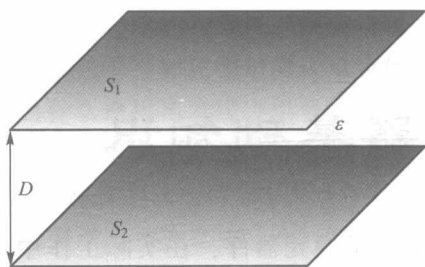


图 1.3 平行板电容器的参数

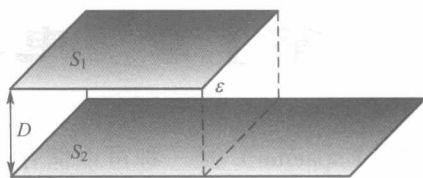


图 1.4 平行板电容器的相对面积

对于平行板电容器而言，填充在两块平行板之间的物质就是空气（暂时把它称为真空吧），我们把真空的**介电常数**标记为符号  $\epsilon_0$ ，其值约为  $8.854187817 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 。

一般情况下，我们不会直接使用介电常数这个值，而是使用另一个参数：**相对介电常数**  $\epsilon_r$  (Relative Permittivity)，也就是某一种电介质材料的介电常数  $\epsilon$  与真空的介电常数  $\epsilon_0$  的比值。换言之，如果以真空的介电常数  $\epsilon_0$  作为一个参考量，那么电介质材料的介电常数可表达为下式：

$$\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$$

因此，平行板电容器的电容量计算公式可表达为下式：

$$C = \epsilon_r \times \epsilon_0 \times \frac{S}{D}$$

那怎么样确定某介质材料的介电常数呢？其实很简单，在结构（面积与距离）相同的平行板电容器之间，分别填充某介质材料或空气（什么都不填充），测试得到两者电容量的比值就是该介质材料对应的相对介电常数，如下所示：

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

其中， $C$  表示填充某电介质材料时平行板电容器的电容量； $C_0$  表示填充空气时平行板电容器的电容量。

实际电子产品中的电容器通常使用如纸、玻璃、陶瓷、云母、有机薄膜等都材料作为电介质（很少使用空气），它们的介电常数比空气都要高，在相同的面积与距离条件下可以制造出电容量更高的电容器，这将非常有利于缩小电容器的结构尺寸，继而达到产品设计小型化的目标。

电容值是厂家在制造电容器时的**标称额定容值 (Rated Capacitance)**，也有些书上称为“静电容量”，其单位有法拉 (Farad, F)、毫法 (mF)、微法 ( $\mu\text{F}$ )、纳法 (nF)、皮法 (pF)，它们之间的换算关系如下所示：

$$1 \text{ 法拉 (F)} = 10^3 \text{ 毫法 (mF)} = 10^6 \text{ 微法 } (\mu\text{F}) = 10^9 \text{ 纳法 (nF)} = 10^{12} \text{ 皮法 (pF)}$$

可以看到，它们之间都是 1000 倍数 ( $10^3$ ) 关系，这与长度单位千米 (km)、米 (m)、毫米 (mm) 是相似的。法拉这个单位比较大，就像我们小老百姓很少论“吨”去买菜一样，所以常用的单位是微法 ( $\mu\text{F}$ )、纳法 (nF) 和皮法 (pF)。

厂家在制作电容器规格书时，通常把相同制造工艺类型的电容器汇总为单一规格书，然后以**额定容值范围  $C_R$  (Rated Capacitance Range)** 来标记，如表 1.1 所示。



表 1.1 电容器参数 (部分)

参 数	数 值
额定容量范围	1~10000 $\mu$ F
额定电压范围	6.3~100V
允许偏差	$\pm 20\%$

电容器在厂家批量生产制造的时候,不可能所有电容量都是精确相等的,而是有一个容量偏差范围,我们称其为**容值偏差 (Capacitance Tolerance)**,通常用百分比来表示,也可以用相应的字母代码来表示,如表 1.2 所示。

表 1.2 允许偏差字母代码

偏 差	字 母 代 码	偏 差	字 母 代 码
$\pm 0.1\%$	B	$\pm 5\%$	J
$\pm 0.25\%$	C	$\pm 10\%$	K
$\pm 0.5\%$	D	$\pm 20\%$	M
$\pm 1\%$	F	$\pm 30\%$	N

例如,容量偏差为 10%的 100 $\mu$ F 电容器,则实际容量在 90~110 $\mu$ F 范围内都是符合标准的。

电容器都有**额定工作电压  $U_R$  (Rated Voltage)**,它是电容器在电路中能够长期可靠地工作而不被击穿所能承受的最大电压,我们通常将其简称为“耐压”,其大小与电容器的结构、电介质材料的种类与厚度等因素有关。

根据平行板电容器的电容量计算公式,为了在更小的体积内实现更大的电容量,电介质材料的厚度应该是非常薄的(平行板之间的距离非常小)。如果对电容器施加一定的电压,电介质材料将承受较大的电场强度,一旦施加的电压超过额定值,就很有可能破坏电介质材料,轻则导致电容击穿而失效,重则产生明火或发生爆炸现象,继而导致连带事故。因此,在实际电路设计中选择电容器的耐压值时,一定要注意设计裕量。

电容器的额定电压有直流(Direct Current, DC)与交流(Alternating Current, AC)两种。对于有极性电容器(如电解电容、钽电容),通常在实际应用中不允许施加反向电压,厂家的数据手册会给出直流额定耐压值( $U_{DC}$ )。当然,也会同时给出反向耐压值 $U_{rev}$ (Reverse Voltage),但这个值往往远比直流额定耐压要小得多,如表 1.3 所示。

表 1.3 反向耐压值

参 数	数 值
反向耐压	$U_{rev} \leq 1V$

对于很多可以作为交流高压应用的无极性电容器(如薄膜电容),数据手册通常还会给出额定交流耐压值,如表 1.4 所示。

表 1.4 额定耐压参数

额定直流耐压值	160	250	400	630	850	1000	1250	1600	2000	2500
额定交流耐压值	110	160	200	220	300	350	450	550	700	900

如果将额定交流耐压值换算为额定直流耐压值来表示，就相当于交流耐压有效值的 1.14 倍以上，这就是为什么数据手册中直流额定耐压标称值总是比交流额定耐压标称值大。

还有一点需要注意的是：有些电容器的电容量会随着两端的电压波动而变化，这主要源自于介质材料的极化饱和。如果在滤波器或时间常数电路中使用容量变动大的电容器，就很有可能产生错误或漂移。在耦合电路中应用也将存在使信号失真的可能，后续章节将详细阐述。

电容器也有**额定工作温度 (Temperature)**，它通常是一个区间范围，超过额定工作温度会影响电容器的容值与寿命。例如，铝电解电容内部存在能够提升电容量的电解液，长时间工作在超过额定温度的环境下会加速电解液的挥发，继而引起电容器的提前失效。

数据手册中一般使用容量温度系数 (Temperature Coefficient of Capacitance, TCC) 来表示，此参数主要与电介质材料的类型有关，如表 1.5 所示为某陶瓷电容的 TCC 值。

表 1.5 某陶瓷电容的 TCC 值

参 数	条 件	数 值
容量温度系数	电介质 BP, 温度范围为-55~125℃, 0V 直流偏置	0±30ppm/℃
	电介质 BX, 温度范围为-55~125℃, 0V 直流偏置	±15%
	电介质 BX, 温度范围为-55~125℃, 额定直流偏置	+15%, -25%

实际的电容器并不是完全理想的，换言之，除了电容特性外，还会有一定的引线寄生电阻与电感，它的等效电路如图 1.5 所示。

除此之外，电容器本体还包含一定的漏电阻与介质损耗，我们通常使用如图 1.6 所示的简化等效电路来模拟一个真实的电容器：

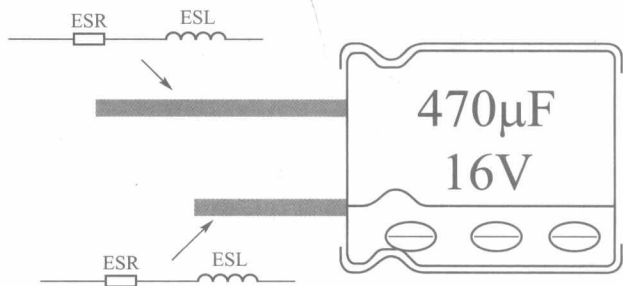


图 1.5 实际电容器的寄生电阻与电感

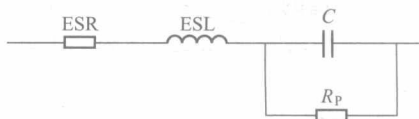


图 1.6 实际电容器的等效模型

其中，ESL (Equivalent Series Inductance) 表示电容器引线及结构的等效串联电感；ESR (Equivalent Series Resistance) 表示电容器引线及结构的等效串联电阻；电阻  $R_p$  表示电容器两个平板之间的绝缘电阻（空气也可以用这个电阻等效），这个值通常比较大，一般至少在兆欧姆级以上。

先来看看绝缘电阻  $R_p$  对电容器的影响。当我们在电容器两端施加直流电压对其进行充电时，电容器的两个极板开始聚集正负电荷，理想电容器的两个平板之间的绝缘电阻应该是无穷大的（完全绝缘不导电，绝缘电阻无穷大），内部不会有电荷通过，但实际电容器的绝缘电阻总是有限的，或多或少会有一些的电荷经过电阻  $R_p$ ，这些电荷形成的电流称为**泄漏**

电流  $I_L$  (Leakage Current), 简称为“漏电流”, 如图 1.7 所示。

外加直流电压对电容器充电, 原来的意思是把好处全部留给电容器  $C$ , 但是由于绝缘电阻  $R_p$  的存在形成了一定的漏电流, 这个漏电流会影响电容器的滤波效果, 也是导致电容器发热损坏的根源之一, 后续我们也将进一步详细讨论。

对于铝电解电容之类的电容器, 其漏电流相对会比较大。因此, 厂家会在相应的数据手册中标记出该参数, 如表 1.6 所示。

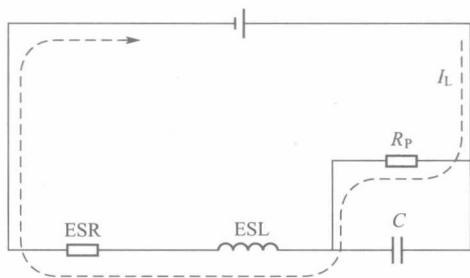


图 1.7 电容器的漏电流

表 1.6 泄漏电流参数

参 数	条 件	数 值
泄漏电流	额定电压 2 分钟后	$I_L \leq 0.01 C_R \times U_R$ 或 $3\mu A$
	额定电压 5 分钟后	$I_L \leq 0.002 C_R \times U_R$ 或 $3\mu A$

有些类型的电容器 (如陶瓷电容) 的漏电流非常小, 就直接用**绝缘电阻 (Insulating Resistance)** 来代替泄漏电流这个参数, 其实两者的意义是完全一样的, 这个绝缘电阻达到 10000MΩ 以上那都是小意思, 如表 1.7 所示。

表 1.7 绝缘电阻

参 数	条 件	数 值
绝缘电阻	测试温度为 +25℃, 额定电压偏置	大于或等于 100000MΩ
	测试温度为 +125℃, 额定电压偏置	大于或等于 100000MΩ

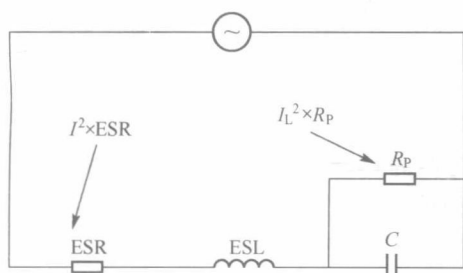


图 1.8 实际电容器的能量损耗

理想的电容器是单纯的储能元器件, 是不会有能量损耗的。但是, 从实际电容器的等效电路中可以看到, 有消耗功率的电阻  $ESR$  与  $R_p$ , 如图 1.8 所示。

当我们在电容器两端施加交流电源电压时, 电容器不断地反复充放电形成回路电流  $I$  的同时, 也会有一定的漏电流  $I_L$ , 由于  $ESR$  与  $R_p$  的存在, 总是会消耗一定的有功功率, 它们的总值为

$$I^2 \times ESR + I_L^2 \times R_p$$

电容器还有另一部分损耗来自电介质材料的分子周期性极化带来的介质损耗, 我们一般不会直接测量电容器的介质损耗是多少, 而是以介质损耗角正切 ( $\tan\delta$ ) 来表示。它是电容器损耗的有功功率与电容器的无功功率的比值, 是衡量电容器工作效率的一个参数, 这个参数可能很少有人注意, 其损耗原理我们将在后续内容中详细介绍。

陶瓷电容之类电容器的  $ESL$  与  $ESR$  比较小, 因此数据手册中不一定有这个值, 似乎没有办法给出相应的损耗参数。然而, 只要你使用的是一个电容器, 数据手册中都会有损耗因数 (Dissipation Factor, BP), 如表 1.8 所示。

表 1.8 损耗因素

参 数	条 件	数 值
BP (损耗因数)	电压 $1.0V_{RMS}$ , 频率为 1MHz	0.05%

铝电解电容的 ESL 与 ESR 相对要大很多, 因此数据手册中通常会直接给出参数, 如表 1.9 所示。

表 1.9 铝电解电容的 ESL 与 ESR 参数

参 数	条 件	数 值
等效串联电感 (ESL)	直径 $D \leq 8\text{mm}$	典型值为 13nH
	直径 $D = 10\text{mm}$	典型值为 16nH
	直径 $D \geq 10\text{mm}$	典型值为 18nH
等效串联电阻 (ESR)	从参数 $\tan\delta$ 与 $C_R$ 计算	$\tan\delta/2\pi f C_R$

表 1.9 中的 ESR 参数值中有一项  $\tan\delta$ , 其实它与损耗因数的含义是完全一样的, 如表 1.10 所示。

表 1.10 铝电解电容参数 (部分)

额定电压/V	额定容值/ $\mu\text{F}$	标称尺寸 $D \times L$	纹波电流/mA	介质损耗角正切 $\tan\delta(100\text{Hz 时})$
6.3	220	5(mm) $\times$ 11(mm)	200	0.23
	2200	10(mm) $\times$ 16(mm)	785	0.25
	6800	13(mm) $\times$ 25(mm)	1880	0.33
	22000	18(mm) $\times$ 40(mm)	3320	0.65

损耗因数就是介质损耗角正切的百分表达方式。例如, 铝电解电容的  $\tan\delta = 0.23$ , 则表示损耗因数为 23%, 比陶瓷电容的损耗因数 0.05% 要大得多 (越小越好)。当然, 陶瓷电容的损耗因数是在频率为 1MHz 条件下测量得到的, 如果铝电解电容也在这个频率下测试, 恐怕就不只是损耗因数大到哪个程度的问题, 而是能不能使用的问题。

这些损耗的总功率 (损耗的有功功率) 将电能转换为热能, 从而使电容器的内部温度升高, 继而影响电容器的工作稳定性与寿命。因此, 损耗过大的电容器不适于高频应用。

从电容器的等效电路中可以看到, 等效电阻 ESR、等效电感 ESL 与电容  $C$  是串联在一起的, 这是一个典型的 RLC 串联谐振电路, 如图 1.9 所示。

它的频响曲线如图 1.10 所示。



图 1.9 电容器的 RLC 串联谐振电路

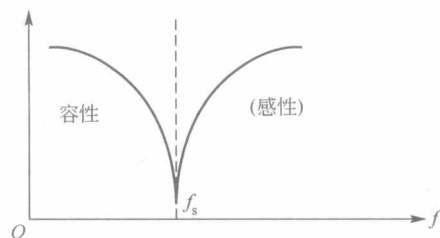


图 1.10 实际电容器的频响曲线

其中,  $f_s$  就是实际电容器的自谐振频率 (Self-Resonance Frequency, SRF), 它可由下式计算获取:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{ESL \times C}}$$

在直流或低频应用的时候, 可以看到电容器的自谐振频率的影响还不是那么明显。然而, 当工作频率越接近  $f_s$ , 容抗会越来越小 (也就是电容的特性越来越少)。例如, 一个电容器的电容值是  $100\mu\text{F}$ , 当它的工作频率越接近本身的自谐振频率时, 这个有效的电容值就越来越低了。

当工作频率为  $f_s$  时, 这个电容器已经不再有电容的特性, 而是一个单纯的电阻, 如果在这个频率点让电容器实现充放电的功能, 那很显然是白忙活了。

当工作频率超过  $f_s$  时, 这个电容器就相当于一个电感了, 没有任何电容的特性了, 也就相当于它做不了电容器本可以做到的任何事情, 这个特性是不是如晴天霹雳一样?

在相同制造工艺类型的前提下, 插件电容器比贴片电容器的 ESL 要大, 因为前者的引脚分布电感要大一些。那某个具体电容器的自谐振频率究竟有多大呢? 我们以  $ESL = 13\text{nH}$  (表 1.9 有此参数) 为例计算一下电容值为  $10\mu\text{F}$  的铝电解电容的自谐振频率, 如下所示:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{13 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^{-6}}} \text{Hz} \approx 441416 \text{Hz} \approx 441 \text{kHz}$$

只有区区的  $441\text{kHz}$ , 而且这个自谐振频率会随着容值的增加而减小。例如, 常用于电源滤波的铝电解电容至少都在  $1000\mu\text{F}$  以上, 按同样的计算原理得到的自谐振频率会在  $44\text{kHz}$  以下。

如果电路设计中一定需要  $10\mu\text{F}$  的铝电解电容进行调试, 但是工作频率是  $1\text{MHz}$  该怎么办? 你可以把多个容量更小的电容器 (如  $1\mu\text{F}$ ) 并联起来, 这样并联后的总 ESL 就会减小, 从而提升了自谐振频率, 拓宽了应用频率范围。

多个电容并联后的频响曲线如图 1.11 所示。

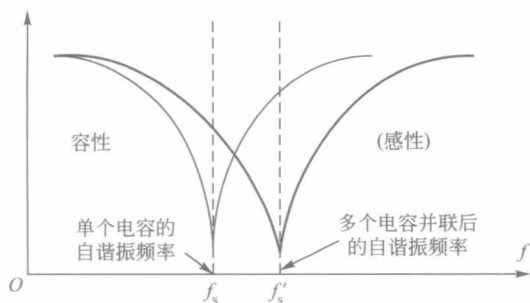


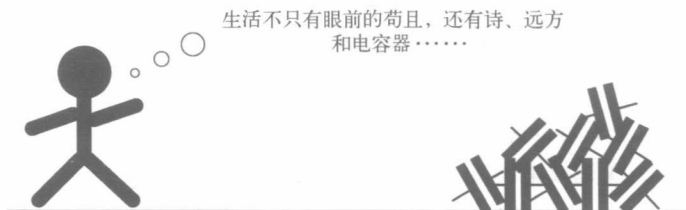
图 1.11 多个电容并联后的频响曲线

条条大路通罗马, 我们也并非只有并联电容器这个办法, 铝电解电容因本身的结构导致 ESL 比较大, 但还有很多其他类型电容器的 ESL 要小得多, 例如, 贴片陶瓷电容。一般贴片陶瓷电容对应的数据手册不会标注这个数据, 因为这个数值实在是太小了。

下面我们以  $1\text{nH}$  为例计算一下  $10\mu\text{F}$  贴片陶瓷电容的自谐振频率, 如下所示:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{1 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^{-6}}} \text{Hz} \approx 1591596 \text{Hz} \approx 1.6 \text{MHz}$$

也就是说，同样工作在 1MHz 的频率，如果选择贴片陶瓷电容，不需要使用容量更小的电容器并联方式也可以达到我们的要求，而且容量越小则相应的自谐振频率越高。



## 第 2 章 电容器标称容值 为什么这么怪

无论是电子工程技术的初学者，还是有着多年工作经验的资深工程师，都不可避免地会发现这样一个现象：电容器上标注的电容值都是如 22pF、33μF、47μF、68μF、220μF、330μF、470μF、680μF 等“奇怪”的标称数值（见图 2.1），但是却很少看到如 400μF、600μF、800μF 等这样“齐整”的电容值，难道做个标称容值“齐整”的电容器就这么困难吗？这种现象在如电阻器的阻值与电感器的感值中也同样存在，为什么会这样呢？

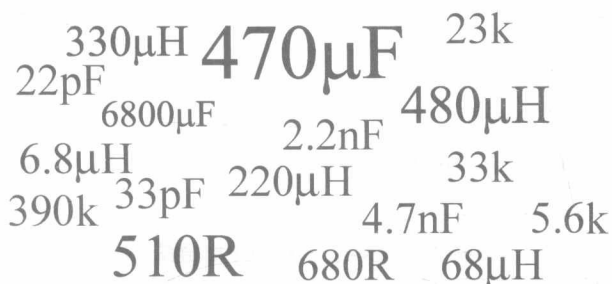


图 2.1 “奇怪”的标称数值

原因其实很简单：这个标称值的设置是有国家标准的，这跟人民币只有 1、2、5 有限的规格是同样的道理。

对于电容器的标称容量值，我们采用国家标准（简称“国标”）GB/T 2471《电阻器和电容器优先数系》，英文名为“Preferred Number Select for Resistors and Capacitors”。其中，“GB”表示国际，“/T”表示推荐标准（没有“/T”，表示国家强制标准，企业进行相关经营活动时必须执行），2471 为标准号。

很多电子工程师对国家标准之类的知识都知之甚少，这很大程度上与其所在的行业是有关系的，如果你工作于一些消费类电子行业，可能十几年甚至几十年都未必真正接触到国家标准，因为实在是用不上呀。但是，类似医疗器械这样的行业，无论你是做调研、软件、硬件、测试、转换、归档等任意一个职业分工，随时都需要参考国家标准来做！

国家推荐标准 GB/T 2471 对应于国际标准 IEC 63（International Electro technical Commission, IEC, 国际电工委员会），它给出了 4 种不同的数系表，分别为 E3、E6、E12、E24，这几种系列之间的区别就是允许偏差的不同，如表 2.1 所示。

表 2.1 E3、E6、E12、E24 数系

系 列	E24	E12	E6	E3	E24	E12	E6	E3
偏 差	±5%	±10%	±20%	>±20%	±5%	±10%	±20%	>±20%
数 系	1.0	1.0	1.0	1.0	3.3	3.3	3.3	
	1.1				3.6			

续表

系 列	E24	E12	E6	E3	E24	E12	E6	E3
偏 差	±5%	±10%	±20%	>±20%	±5%	±10%	±20%	>±20%
数系	1.2	1.2			3.9	3.9		
	1.3				4.3			
	1.5	1.5	1.5		4.7	4.7	4.7	4.7
	1.6				5.1			
	1.8	1.8			5.6	5.6		
	2.0				6.2			
	2.2	2.2	2.2	2.2	6.8	6.8	6.8	
	2.4				7.5			
	2.7	2.7			8.2	8.2		
3.0				9.1				

其中，E3 系列如今应用得非常少，因为偏差实在是太大了。对于电容器而言，E24、E12、E6 这 3 个系列最为常用。

数系的实际用法就是乘 10 的  $N$  次方形式，如对于数系 4.7，则有 4.7pF、47pF、470pF、4.7nF、47nF、47μF 等标称容量值，其他以此类推。

表 2.1 只是电阻器与电容器标称值的一般应用数系。对于精密电阻器与精密电容器，还有 E48、E96、E192 数系，如表 2.2 所示。

表 2.2 E48、E96、E192 数系

系列	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48
偏差	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%
数系	100	100	100	133	133	133	178	178	178	237	237	237	316	316	316
	101			135			180			240			320		
	102	102		137	137		182	182		243	243		324	324	
	104			138			184			246			328		
	105	105	105	140	140	140	187	187	187	249	249	249	332	332	332
	106			142			189			252			336		
	107	107		143	143		191	191		255	255		340	340	
	109			145			193			258			344		
	110	110	110	147	147	147	196	196	196	261	261	261	348	348	348
	111			149			198			264			352		
	113	113		150	150		200	200		267	267		357	357	
	114			152			203			271			361		
	115	115	115	154	154	154	205	205	205	274	274	274	365	365	365
	117			156			208			277			370		
	118	118		158	158		210	210		280	280		374	374	
	120			160			213			284			379		
	121	121	121	162	162	162	215	215	215	287	287	287	383	383	383
	123			164			218			291			388		
	124	124		165	165		221	221		294	294		392	392	
126			167			223			298			397			
127	127	127	169	169	169	226	226	226	301	301	301	402	402	402	
129			172			229			305			407			
130	130		174	174		232	232		309	309		412	412		
132			176			234			312			417			



续表

系列	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48	E192	E96	E48
偏差	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%	±5%	±10%	±20%
数系	422	422	422	505			604	604		723			866	866	866
	427			511	511	511	612			732	732		876		
	432	432		517			619	619	619	741			887	887	
	437			523	523		626			750	750	750	898		
	442	442	442	530			634	634		759			909	909	909
	448			536	536	536	642			768	768		920		
	453	453		543			649	649	649	777			931	931	
	459			549	549		657			787	787	787	942		
	464	464	464	556			665	665		796			953	953	953
	470			562	562	562	673			806	806		965		
	475	475		569			681	681	681	816			976	976	
	481			576	576		690			825	825	825	988		
	487	487	487	583			698	698		835					
	493			590	590	590	706			845	845				
	499	499		597			715	715	715	856					

将这些“奇怪”的标称值的来源归结于国家标准似乎是个比较理想的答案，但势必要打破砂锅问到底的我仍然不禁要问一问：为什么国家标准会选择这些数系呢？

这个问题问得好，问到点子上了。

这里可以回答你的是：有规律，当然有规律！

美国电子工业协会（Electronic Industries Association, EIA）是在20世纪定义的标准电阻值系统，当时的电阻都还是碳膜工艺的，精度非常低。国际电工委员会曾希望改用R系列制度，但因为E系列已经在一些国家采用，改变起来困难较大，所以至今在电子元件行业（主要是电阻、电容和电感）仍然以E系列为主。

E系列是一种由几何级数构成的数列，源自Electricity的首字母，它是以 $\sqrt[6]{10} = 1.5$ 、 $\sqrt[12]{10} = 1.21$ 、 $\sqrt[24]{10} = 1.1$ 为公比的几何级数数列，分别称为E6系列、E12系列、E24系列。

所谓的“公比”，就是等比数列中后一项与前一项的商，那何谓“几何级数”？这里我们先给大家讲个“棋盘上的粮食”的故事：

古时候某个王国里，一位聪明的大臣发明了国际象棋献给了国王，国王从此迷上了下棋。为了对聪明的大臣表示感谢，国王答应满足这个大臣的一个要求。大臣说：“就在这个棋盘上放一些米粒吧。第1格放1粒米，第2格放2粒米，第3格放4粒米，然后是8粒、16粒、32粒……一直到第64格”。

这些米粒全部加起来后等于： $2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{63} = 2^{64} - 1 = 18446744073709551615$ 粒，大约2200亿吨，相当于全世界几百年整个的产量，如图2.2所示。

棋盘格子中的米粒数就是几何级数的数列，这个数列的公比就是2，是一个数学上的概念，可以表示成 $x^y$ ，即 $x$ 的 $y$ 次方的形式增长。通常情况下， $x=2$ ，也就是常说的翻几（ $y$ 值）番。