

实验四：电容电感高低温实验

一、实验目的

1. 学习空间高低温环境
2. 学习阻抗分析仪（或 LCR 仪）使用方法
3. 学习和测量电容、电感频率特性曲线与温度的关系；

二、实验设备和仪器

高低温交变湿热试验箱、深冷试验箱

阻抗分析仪或 LCR 仪

三、实验原理

3.1 电容

电容器的基本特征是电容内部储存的电荷 Q 与其两端的电压 U 成正比，比例系数就是其电容值 $C=Q/U$ 。电容器在电路中的主要作用是滤波、谐振、交流耦合、旁路和去耦等。

电容器的种类远比电阻器多，电容器容量的容差比电阻器阻值的容差大，通用电容一般为 $\pm 5\% \sim \pm 20\%$ ，高容量的电解电容器或者高介电常数的陶瓷电容器可达 $-20\% \sim +80\%$ ，但多数应用场合对电容精度的要求低于电阻。

电容器的温度系数通常高于电阻器的温度系数，电容器的容量有可能随工作频率、工作电压而变化，有的电容器（如电解电容器）与二极管一样具有极性，不能反接，在直流和交流工作状态下的额定电压不同，通常后者低于前者。

额定电压是指在额定温度与最小工作温度之间的任一温度下，可连续施加在电容器上的最大直流电压，或者最大交流电压的有效值，或者浪涌脉冲电压的峰值。

额定交流电压<额定直流电压<能耐受的瞬态浪涌电压（通常是直流耐压的 2.5 倍以上）。

引起电容器永久性损坏电压称为击穿电压。击穿电压通常是额定电压的 2 倍左右。

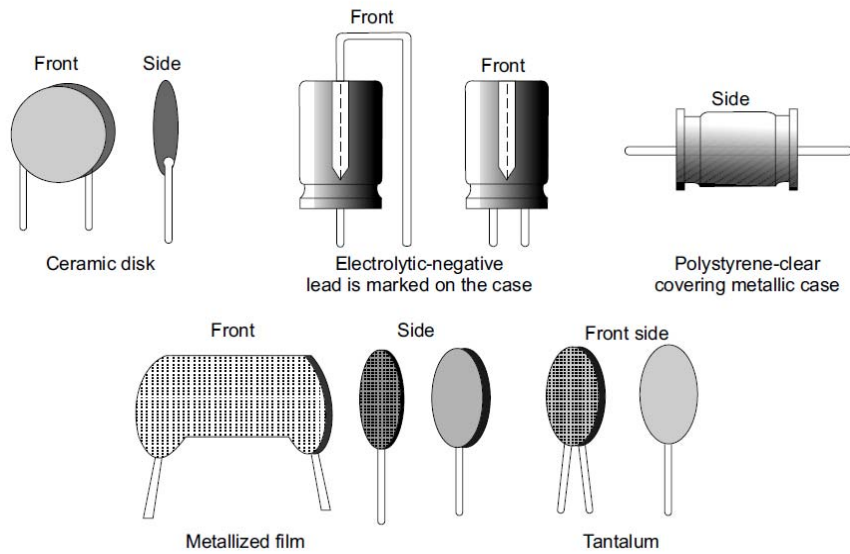


图 1 常见电容器的外形

根据内部介质不同，可分为纸介、无机介质（如云母、玻璃釉和陶瓷）、有机介质（涤纶、聚丙烯、聚碳酸酯）、气体介质和电解电容器。

根据容量可调性，可分为固定、微调 and 可变电容器。

根据有无极性，可分为非电解电容器和电解电容器。

表 1 电容器的型号命名方法

第一部分(主称)		第二部分(材料)		第三部分(特征)	
C	电 容 器	C	瓷介	W	微调
		Y	云母		
		I	玻璃釉		
		O	玻璃(膜)		
		B	聚苯乙烯		
		F	聚四氟乙烯		
		L	涤纶		
		S	聚碳酸酯		
		Q	漆膜	J	金属膜
		Z	纸介		
		J	金属化纸介		
		H	混合介质		
		D	铝电解		
		A	钽电解		

		N	铌电解		
		T	钛电解		

电容器的容量会随工作电压、温度、频率和老化时间而变化，其变化程度比电阻器更剧烈，而且不同类型的电容器可能表现出完全不同的变化幅度和变化规律。

电容器的标称容量通常是在 25℃ 下测量的容值。

电容器的温度特性：最大工作温度，最小工作温度，额定温度，温度系数。其中额定温度是指可以连续施加额定电压的最高环境温度。

不同的电容的温度特性可能相差甚大。如同为陶瓷电容，COG 电容器的容量几乎不随温度变化，X7R 的容量在额定工作温度范围内变化不超过 12%，而 Y5V 的容量在额定工作温度范围内的变化可达 70% 以上。

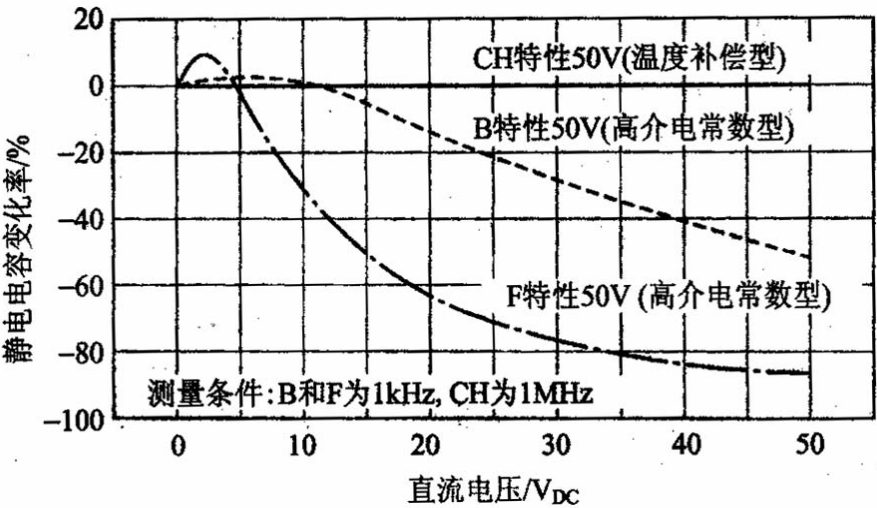


图 1 陶瓷电容器容量随直流电压的变化

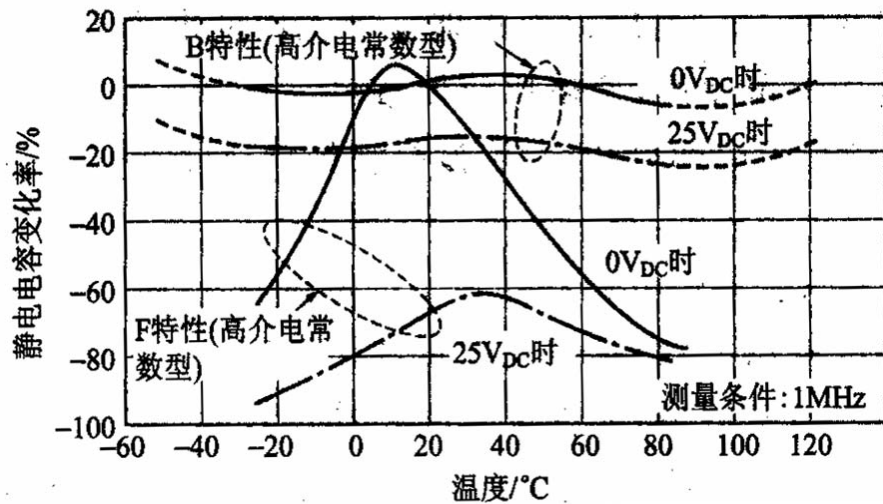


图 2 陶瓷电容器容量随温度的变化

容值漂移估算

$$C_{\text{实际最大}} = C_{\text{标称}} \times (1 + \text{最大正容差}) \times (1 + \text{最大正温度系数}) \times (1 + \text{最大正电压系数}) \times (1 + \text{最大正频率系数}) \times (1 + \text{最大正老化系数})$$

$$C_{\text{实际最小}} = C_{\text{标称}} \times (1 + \text{最大负容差}) \times (1 + \text{最大负温度系数}) \times (1 + \text{最大负电压系数}) \times (1 + \text{最大负频率系数}) \times (1 + \text{最大负老化系数})$$

表 2 三种电容器容值变化范围的估算

电容类型	标称电容	额定电压	初始容差	温度系数	电压系数	频率系数	老化系数	温度范围	电压范围	频率范围	实际最大电容	实际最小电容	变化比
Z5U 陶瓷	0.1uF	50V		+22%~-56%	在 60% 额定电压处	10kHz 处 -3%, 100kHz 处 -6%	100 小时后 -6%	+10°C ~ +85°C	5 ~ 30V	10kHz~100kHz	0.219uF	0.0202uF	11: 1
聚碳酸酯	0.1uF	63V	-20%~+80%	±10%							0.11uF	0.089uF	1.23: 1
钽珠电解	0.1uF	35V		±20%	-35%						0.125uF	0.038uF	3.29: 1

实际电容值随容差、温度、电压、频率和时间的变化最大可以达到 10 倍以上，故不能忽视，尤其是在定时、调谐、振荡器等对电容值的精度及稳定性要求

高的电路中。

对于不同类型的电容，容差和漂移的影响程度是不一样的。在此例中，聚碳酸酯最好，而 Z5U 多层陶瓷电容最差。

对于不同类型的电容，决定容值变化的关键因素是不一样的，如聚碳酸酯主要受初始容差支配，而钽珠电容在高频段表现出了最坏的性能。

1. 容抗

在正弦交流电路中，电容器的容抗 $X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$ 。

当电源频率变化时，容抗 X_C 都是频率 f 的函数，我们称之为频率特性。典型的电容元件的频率特性如图 1 所示。

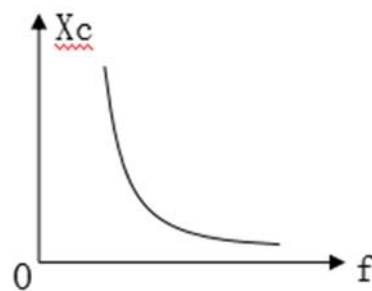


图 1 电容元件的频率特性

不同容量、不同类型的电容因自谐振频率不同，所以具有不同的适用频率范围。如容量为 10nF 的陶瓷电容器的自谐振频率为 10~100MHz，10uF 钽电解电容自谐振频率为 1MHz。

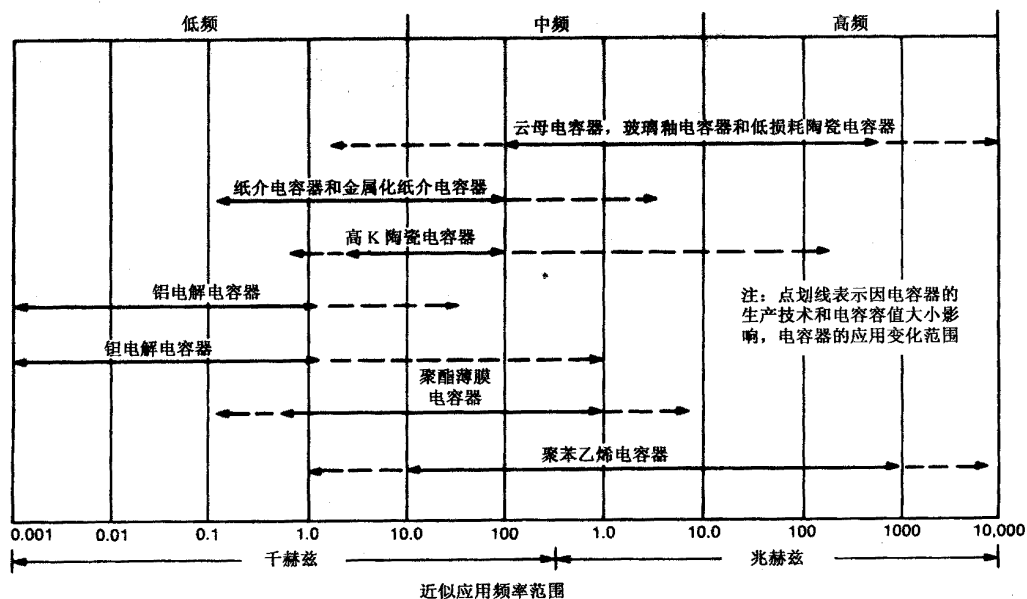


图 3 常见电容器的适用频率范围（虚线为由于制造工艺和容差引起的变化）

非电解电容特点

优点：（1）容量范围大：10pF~1uF；寄生电感低：（2）由于采用多层介质叠加结构（而非如铝电解电容器那样的卷绕结构），寄生电感和 ESR 都非常低，特别适用于高频滤波。（3）体积小：适合片式和表面贴装应用（片式电容的封装有 0603、0805、1206 等）；（4）可靠性高：容值稳定性好，耐高温，耐潮湿；（5）安全性高：电容击穿时，不燃烧，不爆炸。

缺点：工作电压较低，通常≤63V；大容量仍然无法实现（容值范围在 1000pF~10uF）；机械强度低，易碎易裂。

类别	材料代号	型号举例	介电常数与容量	温度范围及容差	可靠性特征	应用范围
I 类	COG、NPO	CC1、CC2	15~100, 电容值范围受限 (<1000pF)	- 25 ~ +85℃ ±10%	最好(C 表示温度系数~0, 0 表示具有温度系数为负, G 表示温度系数为 60ppm/℃, 容值几乎不随电压或频率而变化)	适于高频、特高频、甚高频应用

II 类	X5R、X7R	CT1、CT2	2000~4000，可在合理的封装尺寸内达到 1uF	- 55 ~ +125℃ ±15%	中等（稳定性不如 COG，损耗较大，电容值和损耗因素随电压和频率的变化大，X 表示最低工作温度-55℃，5 表示最高工作温度为 85℃，7 表示最高工作温度为 125℃，R 表示容量误差为 ±15%）	适于中低频应用
III 类	Y5V、Z5U	CT3	高，可做较大容量电容	- 30 ~ +85℃ ±22% ~ -82%	差（精度低，温度系数高，额定温度范围窄，损耗也大）	目前已较少使用

（1）有机介质电容：相对于无机介质，容量范围大，绝缘电阻高，工作电压高，温度范围宽，但化学稳定性差，易老化。

（2）聚酯膜电容：亦称金属化聚乙烯电容，温度系数小，介质损耗较大且明显地随温度和工作频率变化。

（3）聚碳酸酯电容：温度系数小，介质损耗低，耐热性好。

（4）聚丙烯和聚苯乙烯电容：介质损耗极低，温度系数为负且不低，耐热性差（软化温度 75~100℃），尺寸较大。

（5）金属化纸介电容

以镀有铝箔的蜡纸作为介质，容量范围 10nF~10uF，最高耐压 500V，精度 ±10%

温升小，过功率能力强，与塑料相比，不易自燃，但易吸潮。

（6）云母电容

在云母上镀银，多层层叠而成，容量范围 5~5100pF，工作电压 50V~500V，精度可达±0.5%，稳定性好，分布电感小，精度高，损耗低，绝缘电阻大，温度特性和频率特性好，但造价高、体积/容量比大，适合用于高电压、大功率场合。

（7）玻璃釉电容

介电系数高，体积小，损耗低，稳定性好，漏电流低，能在较高温度下工作，耐潮湿性较好，但造价贵，适合用于电子仪器。

电解电容

铝电解电容器的容量-体积比在所有电容器中是最高的，而且价格低，因而成为大容量电容器的主角，但从可靠性角度看，存在以下问题：寿命较短。

工作寿命和储存寿命都有限，因为内部的电解液逐渐干枯会导致电容量逐渐减少，是少数几种不使用也会退化的电子元件之一。在各类电容器中，受温度影响而老化的程度最高，也是储存寿命最短的元器件之一。

影响寿命的因素有环境温度、自身发热、整体密封性、施加的电压等。怕热，高温下可能有气体逸出，不仅会影响周边元器件，而且有可能诱发电容器爆炸，因此工作温度严禁超过额定温度，安装时要使其远离热源。

普通电解电容器在 105℃ 下的寿命约为 1000~2000h，高可靠电容器可以达到 7000h。在高温区满足 10℃ 法则，即温度每升 10℃ 寿命减半。

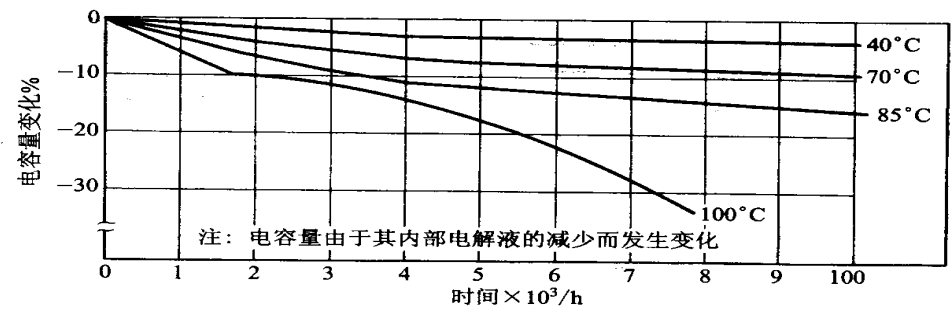


图 4 铝电解电容器的温度与寿命的关系

工作温度范围较窄

最大工作温度范围约为 -40℃~+85℃，典型工作温度范围 0~60℃（电容量变化量±20%）

电容量随温度↓而↓，相对于室温，-40℃时的容值可能会下降 20%以上。

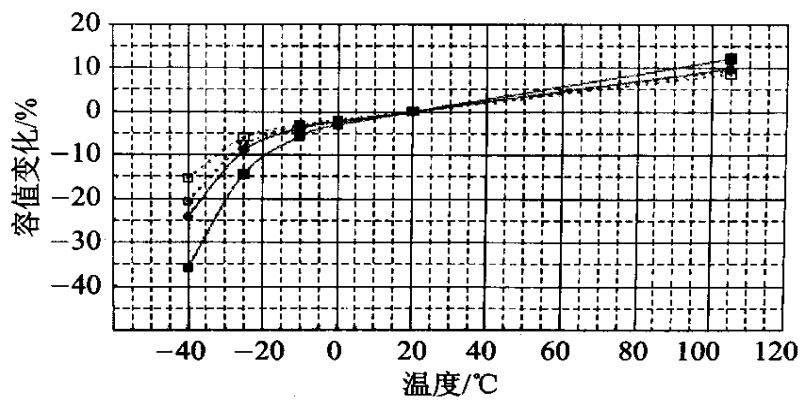


图 5 铝电解电容器的容值随温度的相对变化

寄生参数大：采用卷绕式结构，分布电感大，只能用于 25kHz 以下的低频旁路、滤波及耦合电路；ESR 在所有电容器中最大，且随温度变化剧烈（-40℃的阻值可上升到+25℃时的 10~100 倍）。多个小容量电解电容器并联的串联阻抗要低于单个同容量电解电容器。自谐振频率有可能低于 100kHz，故只能用于低频电路。

体积重量大：通常是电路中体积最大和质量最大的元件，抗振动能力较薄弱，因此需小心选择固定安装方式，保证其连接端的机械强度。

具有自愈性：在偶然击穿后，由于电解质的作用，击穿处将重新形成氧化膜，而自动恢复其绝缘性。

固体钽电解电容

基本结构：固体二氧化锰作为电介质，烧结的钽块作为阳极。

与铝电解电容器相比，其优点是：（1）温度范围宽：可达-55℃~+125℃；（2）漏电流小、绝缘电阻高： $<0.01CV[\mu A]$ ，可与品质最好的铝电解电容相比；（3）损耗因数低：0.04~0.1，约比铝电解电容好两倍；（4）温度系数低：电容值在工作温度范围内的变化 $\pm 3 \sim \pm 15\%$ ；（5）寄生参数小：自身电感小，串联电阻较低，工作频率可达 50kHz 以上；（6）有可能反极性使用：在某些工作电压范围内体积小：电容-体积比大于铝电解电容器，可以做成片状电容；（7）可靠性高：寿命长，失效率比铝电解电容器低 1~2 个数量级，常常作为军事用途。

与铝电解电容器相比，其缺点是：（1）价格高，因为钽属于稀有金属；（2）对脉动电流的承受力差；（3）容量范围和工作电压范围相对较窄。

2.感抗

在正弦交流电路中，电感的感抗 $X_L = \omega L = 2\pi fL$ 。

当电源频率变化时，感抗 X_L 和容抗 X_C 都是频率 f 的函数，我们称之为频率特性。典型的电感元件的频率特性如图 2 所示。

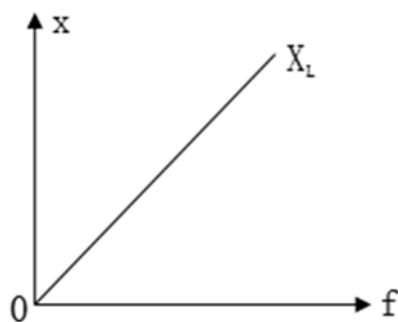


图 2 电感元件的频率特性

四、 实验内容与步骤

(1) 测量电容与电感类型

序号	名称	规格	数量
1	铝电解电容	1uF	1
2	陶瓷电容	100nF	1
3	钽电容	1uF	1
4	电感	1uH	1
1	电感	10uH	1

(2) 与电阻测量类似，需要用电烙铁焊接镀银线与电容/电感，并在镀银线外端对不同电容/电感进行标记（容值/电感值、材料、学号），方便多个电容/电感多人同时测量。

(3) 测量铝电解电容、陶瓷电容、钽电容频率-容抗曲线，及电感的频率-感抗曲线。

(4) 测量频率-容抗曲线，及频率-感抗曲线随温度变化情况。

将电容、电感放入高低温交变湿热试验箱中，连接好电源线，打开电源开关。设置温度湿度，打开设备运行开关，设备运行指示灯发亮（加热/制冷状态），观察恒温箱温度的变化。在温箱温度达到预设值后用 LCR 仪测出频率-容抗、频率-感抗曲线并记录。注意需等待温度稳定 2~3 分钟后再做测量工作。

(4) 重复第三步骤，选择温度为-40℃、-20，0℃、20℃、40℃、60.0℃、80.0℃、100.0℃测出四种电阻在上述温度点时的频率-容抗曲线、频率-感抗曲线。

(5) 根据测试实验结果，分析实验数据，并给出实验结论。

-40 度

[illegible] $\mathbf{z})$ [illegible] $\mathbf{z})$ [illegible] $\mathbf{z})$ [illegible]

